

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MARCOS LEONARDO RAMOS

**IMPLEMENTAÇÃO DE PONTE CONVERSORA
MODIFICADA CA-CC DE OITO TIRISTORES PARA
MELHORIA DE FATOR DE POTÊNCIA**

ITAJUBÁ

2020

MARCOS LEONARDO RAMOS

**IMPLEMENTAÇÃO DE PONTE CONVERSORA
MODIFICADA CA-CC DE OITO TIRISTORES PARA
MELHORIA DE FATOR DE POTÊNCIA**

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação de Ciências em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal de Itajubá, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho

Coorientador: Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek

Examinador interno: Prof. Dr. José Carlos Grilo Rodrigues

Examinador externo: Dr. Vinícius Zimmermann Silva (Petrobras)

ITAJUBÁ
2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, aos meus pais, José Ramos Filho (in memoriam) e Maria José de Moraes Ramos (in memoriam) que dedicaram suas vidas à formação de seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado me dando força, saúde e perseverança para seguir adiante.

À minha esposa, Veranice Fernandes Ramos e a minha filha Ana Flávia Fernandes Ramos pelo apoio, amor e paciência, principalmente nas horas mais difíceis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de realização desse trabalho.

Ao meu prezado orientador, Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho e ao meu prezado Coorientador Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek, pelas orientações e em especial, por me conduzirem, sempre me apoiando para que eu pudesse dar um passo a cada dia com serenidade, me fazendo acreditar que por mais difícil e árduo que seja o caminho, devemos seguir em frente.

A todos aqueles que direta ou indiretamente participaram nesta caminhada, e em especial aos meus colegas Kaio Henrique Dalmone Do Carmo e Renan Beccalli Bicalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é implementar em laboratório uma bancada de teste totalmente controlada para operar como ponte modificada controlada e como ponte convencional e verificar a melhoria do fator de potência da ponte modificada controlada em relação à ponte convencional, considerando para ambas o critério da mesma tensão média de saída em CC. Também, outros resultados experimentais serão avaliados, como por exemplo: fator de deslocamento, forma de onda de tensão e de corrente de entrada, forma de onda da tensão de saída, distorção harmônica de corrente, espectro harmônico de corrente, topologia do circuito de controle de disparo auxiliar.

As principais motivações para realizar este trabalho são: verificar experimentalmente a melhoria do fator de potência da ponte modificada controlada com relação a ponte convencional; propor uma topologia alternativa para o circuito de controle de disparo auxiliar; comparar o circuito de controle de disparo auxiliar ao circuito de controle de disparo principal.

A bancada de teste é uma ponte conversora CA-CC, configuração Graetz, alimentada por um sistema elétrico trifásico a 4 fios, equipada com oito tiristores e dois circuitos de controle de disparo de seis pulsos independentes. Dos oito tiristores, seis são tiristores de fase e dois são tiristores de neutro; dos circuitos de disparo independentes, um circuito é dedicado ao disparo dos tiristores de fase e denominado de circuito de controle de disparo principal, o outro circuito é dedicado ao disparo dos tiristores de neutro e denominado de circuito de controle de disparo auxiliar.

A bancada de teste funciona em dois modos de operação; no modo de operação 1, a bancada funciona como ponte modificada controlada, na qual operam os seis tiristores de fase e os dois tiristores de neutro e seus respectivos circuitos de controle de disparo principal e auxiliar; no modo de operação 2, a bancada funciona como ponte convencional, na qual operam os seis tiristores de fase e o circuito de controle de disparo principal, permanecendo inoperantes os dois tiristores de neutro e o circuito de controle de disparo auxiliar.

Palavras-chaves: Conversor de Fase Controlada Modificada; Conversor Modificado; Disparo Auxiliar; Disparo Principal; Fator de Potência Melhorado; Ponte Modificada Controlada.

ABSTRACT

The purpose of this work is the development and the implementation at laboratory the one full-controlled test bench to operate as a controlled modified bridge and as a conventional bridge and check the power factor improvement the controlled modified bridge in comparison the conventional bridge, considering for both the same average DC output voltage criterion. Also, other experimental results will be evaluated, such as: displacement factor, input voltage and current waveform, output voltage waveform, current harmonic distortion, current harmonic spectrum, auxiliary firing control circuit topology.

The main motivations for carrying out this work are: to check experimentally the improvement of the power factor of the modified bridge in comparison to the conventional bridge; to purpose an alternative topology for the auxiliary firing control circuit; to compare the auxiliary firing control circuit to the main firing control circuit.

The test bench is an AC-DC converter bridge that works as a rectifier, Graetz configuration, powered by a 4-wire three-phase electrical system. The test bench is equipped with eight thyristors and two independent firing control circuits. The eight thyristors, six are phase thyristors and two are neutral thyristors; the two independent firing circuits, one is a main firing control circuit for phase thyristors, the other is an auxiliary firing control circuit for neutral thyristors.

The bench works in two operating modes; in operating mode 1, it works as a modified bridge, in which six phase thyristors, two neutral thyristors, one main firing and one auxiliary firing are working; in operating mode 2, it works as a conventional bridge, in which six phase thyristors and one main firing are working, but the neutral thyristors and auxiliary firing are ineffective.

Keywords: Auxiliary Firing; Controlled Modified Bridge; Improvement Power Factor; Main Firing; Modified Converter; Modified Bridge; Modified Phase-Controlled Converter.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	PONTE CONVERSORA	32
2.1	Geral.....	32
2.2	Ponte conversora trifásica configuração Graetz controlada	33
2.2.1	Geral.....	33
2.2.2	Formas de onda de entrada e de saída da ponte convencional.....	34
2.2.2.1	Carga puramente resistiva para $\alpha = 0^0$	34
2.2.2.2	Carga parte resistiva e parte indutiva para $\alpha = 0^0$	35
2.2.2.3	Carga parte resistiva e parte indutiva para $\alpha > 0^0$	36
2.2.3	Equações da ponte convencional.....	37
2.2.3.1	Geral	37
2.2.3.2	Equação do fator de potência	37
2.2.3.3	Equação da tensão média de saída em CC	38
2.3	Ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz semicontrolada	39
2.3.1	Geral.....	39
2.3.2	Formas de onda de entrada e de saída da ponte modificada semicontrolada	40
2.3.2.1	Carga puramente resistiva para $\alpha = 0^0$	40
2.3.2.2	Carga parte resistiva e parte indutiva para $\alpha = 0^0$	41
2.3.2.3	Carga parte resistiva e parte indutiva para $\alpha > 0^0$	42
2.3.3	Equações da ponte modificada semicontrolada	44
2.3.3.1	Geral	44
2.3.3.2	Equações para $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$	44
2.3.3.3	Equações do fator de potência para $30^0 < \alpha \leq 150^0$	45
2.3.3.4	Equação do fator de deslocamento para $30^0 < \alpha \leq 150^0$	45
2.3.3.5	Equação da tensão média de saída em CC para $30^0 < \alpha \leq 150^0$	46
2.4	Ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz controlada	46
2.4.1	Geral.....	46
2.4.2	Formas de onda de entrada e de saída na ponte modificada controlada.....	48
2.4.2.1	Carga puramente resistiva para $\alpha = 0^0$ e $\delta = 0^0$	48
2.4.2.2	Carga parte resistiva e parte indutiva para $\alpha = 0^0$ e $\delta = 0^0$	49
2.4.2.3	Carga parte resistiva e parte indutiva para $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ e $\delta \geq 0^0$	50
2.4.2.4	Carga parte resistiva e parte indutiva para $30^0 < \alpha \leq 150^0$ e $\delta \geq 0^0$	52
2.4.3	Equações da ponte modificada controlada.....	54
2.4.3.1	Geral	54
2.4.3.2	Equações para $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ e $\delta \geq 0^0$	54
2.4.3.3	Equações do fator de potência para $30^0 < \alpha \leq 150^0$ e $\delta \geq 0^0$	55
2.4.3.4	Equação do fator de deslocamento para $30^0 < \alpha \leq 150^0$ e $\delta \geq 0^0$	55
2.4.3.5	Equação da tensão média de saída em CC para $30^0 < \alpha \leq 150^0$ e $\delta \geq 0^0$	56
2.5	Tensão de saída da ponte modificada controlada x tiristores operantes	56
2.5.1	Geral.....	56
2.5.2	Tensão de saída x tiristores operantes para $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ e $\delta \geq 0^0$	56
2.5.3	Tensão de saída x tiristores operantes para $30^0 < \alpha \leq 150^0$ e $\delta \geq 0^0$	57
2.5.4	Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_1 (VPN=Vab)	59
2.5.5	Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_2 (VPN=Van)	60
2.5.6	Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_3 (VPN=Vac)	61

2.5.7	Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_4 (VPN=-Vab).....	62
2.5.8	Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_5 (VPN=-Van).....	63
2.5.9	Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_6 (VPN=-Vac).....	64
3	PROPOSTA DE PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DA PONTE MODIFICADA CONTROLADA	66
3.1	Geral.....	66
3.2	Placa eletrônica de 6 pulsos	67
3.3	Circuito de controle de disparo principal.....	76
3.4	Circuito de controle de disparo auxiliar	78
3.5	Circuito de controle de disparo da bancada de teste	80
4	IMPLEMENTAÇÃO DA BANCADA DE TESTE.....	82
4.1	Geral.....	82
4.2	Modos de operação da bancada de teste	84
5	ESTUDO DE CASO	86
5.1	Geral.....	86
5.2	Bancada de teste operando no modo de operação 1 e no modo de operação 2	88
5.2.1	Geral.....	88
5.2.2	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 0^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 0^\circ$).....	88
5.2.3	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 0^\circ$; $\delta = 30^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 0^\circ$)	90
5.2.4	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 30^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 30^\circ$)	92
5.2.5	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 30^\circ$; $\delta = 30^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 30^\circ$)	93
5.2.6	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 45^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 43,38^\circ$)	95
5.2.7	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 60^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 54,74^\circ$)	96
5.2.8	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 60^\circ$; $\delta = 30^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 60,00^\circ$)	98
5.2.9	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 70^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 61,50^\circ$)	100
5.2.10	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 70^\circ$; $\delta = 30^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 66,44^\circ$)	101
5.2.11	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 80^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 67,67^\circ$)	103
5.2.12	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 80^\circ$; $\delta = 30^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 72,39^\circ$)	104
5.2.13	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 90^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 73,22^\circ$)	106
5.2.14	Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 90^\circ$; $\delta = 30^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 77,80^\circ$)	107
5.3	Fator de potência e fator de deslocamento da ponte modificada controlada e da ponte convencional	109
5.3.1	Geral.....	109
5.3.2	Fator de potência e fator de deslocamento para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$	109
5.3.3	Fator de potência e fator de deslocamento para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$	110
5.4	Distorção harmônica total da ponte modificada controlada e da ponte convencional	111
5.4.1	Geral.....	111
5.4.2	Distorção harmônica total para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$	112
5.4.3	Distorção harmônica total para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$	113
6	RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS	116
6.1	Bancada de teste no modo de operação 1 ($0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha \geq 0^\circ$)	116
6.2	Bancada de teste no modo de operação 1 ($30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha > 0^\circ$)	117

6.3	Análise dos resultados da bancada de teste	119
7	CONCLUSÕES.....	120
8	ANEXOS	122
8.1	Diagrama de blocos da ponte modificada controlada no Matlab / Simulink	122
8.2	Diagrama de blocos da ponte modificada semicontrolada no Matlab / Simulink.....	127
8.3	Diagrama de blocos da ponte convencional no Matlab / Simulink.....	130
9	REFERÊNCIAS.....	134

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ponte conversora trifásica configuração Graetz – controlada (adaptado de [2], [5-7])	25
Figura 2: Ponte conversora trifásica configuração Graetz – semicontrolada (adaptado de [2], [5-7]).....	25
Figura 3: Ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz – controlada (adaptado de [2], [9-10])	26
Figura 4: Ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz – comutação forçada (adaptado de [2]).....	26
Figura 5: Ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz – semicontrolada (adaptada de [2])	27
Figura 6: Ponte convencional (adaptado de [2], [5-7]).....	34
Figura 7: Ponte convencional – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga puramente resistiva (adaptado de [24])	35
Figura 8: Ponte convencional – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $\alpha = 0^0$ (adaptado de [24]).....	36
Figura 9: Ponte convencional – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $\alpha > 0^0$ (adaptado de [24]).....	37
Figura 10: Ponte modificada semicontrolada (adaptado de [2])	40
Figura 11: Ponte modificada semicontrolada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga puramente resistiva e $\alpha = 0^0$ (adaptado de [2])	41
Figura 12: Ponte modificada semicontrolada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $\alpha = 0^0$ (adaptado de [2])	42
Figura 13: Ponte modificada semicontrolada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ (adaptado de [2])	43
Figura 14: Ponte modificada semicontrolada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $30^0 < \alpha \leq 150^0$ (adaptado de [2])	44
Figura 15: Ponte modificada controlada (adaptado de [2], [21], [32])	48
Figura 16: Ponte modificada controlada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga puramente resistiva e $\alpha = 0^0$ e $\delta = 0^0$ (adaptado de [2], [21])	49
Figura 17: Ponte modificada controlada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $\alpha = 0^0$ e $\delta = 0^0$ (adaptado de [2], [21])	50
Figura 18: Ponte modificada controlada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ e $\delta \geq 0^0$ (adaptado de [2], [21])	51
Figura 19: Ponte modificada controlada – corrente de entrada de fase e de neutro para carga RL e $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ e $\delta \geq 0^0$ (adaptado de [2], [21])	52
Figura 20: Ponte modificada controlada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $30^0 < \alpha \leq 150^0$ e $\delta \geq 0^0$ (adaptado de [2], [21])	53
Figura 21: Ponte modificada controlada – corrente de entrada de fase e de neutro para carga RL e $30^0 < \alpha \leq 150^0$ e $\delta \geq 0^0$ (adaptado de [2], [21])	54
Figura 22: Ponte modificada controlada (fase A) – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ e $\delta \geq 0^0$ (adaptado de [2], [21])	57
Figura 23: Ponte modificada controlada (fase A) – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $30^0 < \alpha \leq 150^0$ e $\delta \geq 0^0$ (adaptado de [2], [21])	59
Figura 24: Ponte modificada controlada – tiristores T1 e T6 operantes (adaptado de [2], [32])	60
Figura 25: Ponte modificada controlada – tiristores T1 e T8 operantes (adaptado de [2], [32])	61
Figura 26: Ponte modificada controlada – tiristores T1 e T2 operantes (adaptado de [2], [32])	62
Figura 27: Ponte modificada controlada – tiristores T4 e T3 operantes (adaptado de [2], [32])	63
Figura 28: Ponte modificada controlada – tiristores T4 e T7 operantes (adaptado de [2], [32])	64
Figura 29: Ponte modificada controlada – tiristores T4 e T5 operantes (adaptado de [2], [32])	65
Figura 30: Ponte modificada controlada (adaptado de [2], [21], [32])	67
Figura 31: Diagrama de blocos – placa eletrônica de 6 pulsos (adaptado de [27], [28], [31], [33]).....	69
Figura 32: TCA 785 – pinagem e diagrama de blocos (adaptado de [23], [27-29])	71
Figura 33: TCA 785 - formas de onda / rampa de disparo (adaptado de [27-29]).....	72
Figura 34: CI 555 – configuração monoestável (adaptado de [27-28], [30]).....	72
Figura 35: CI 555 – ajuste de largura de pulso (adaptado de [27-28])	73
Figura 36: TIL 113 – diagrama interno (adaptado de [27-28]).....	73
Figura 37: Diagrama do circuito de ataque (adaptado de [27-28]).....	74
Figura 38: Placa eletrônica de 6 pulsos para disparo de tiristores (adaptado de [22,23,27,31], com os pinos “1” dos CI 555 aterrados)	75
Figura 39: Diagrama de blocos – disparo principal (adaptado de [33]).....	78
Figura 40: Diagrama de blocos – disparo auxiliar (adaptado de [33]).....	80
Figura 41: Bancada de teste	84
Figura 42: Tensão e corrente de entrada (fase A).....	88
Figura 43: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 0^0$; $\delta = 0^0$).....	89

Figura 44: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 0^0$; $\delta = 0^0$)	90
Figura 45: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 0^0$; $\delta = 30^0$)	91
Figura 46: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 0^0$; $\delta = 30^0$)	92
Figura 47: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 30^0$; $\delta = 0^0$)	92
Figura 48: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 30^0$; $\delta = 0^0$)	93
Figura 49: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 30^0$; $\delta = 30^0$)	94
Figura 50: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 30^0$; $\delta = 30^0$)	95
Figura 51: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 45^0$; $\delta = 0^0$)	95
Figura 52: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 45^0$; $\delta = 0^0$)	96
Figura 53: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 60^0$; $\delta = 0^0$)	97
Figura 54: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 60^0$; $\delta = 0^0$)	98
Figura 55: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 60^0$; $\delta = 30^0$)	99
Figura 56: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 60^0$; $\delta = 30^0$)	100
Figura 57: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 70^0$; $\delta = 0^0$)	100
Figura 58: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 70^0$; $\delta = 0^0$)	101
Figura 59: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 70^0$; $\delta = 30^0$)	102
Figura 60: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 70^0$ e $\delta = 30^0$)	103
Figura 61: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 80^0$; $\delta = 0^0$)	103
Figura 62: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 80^0$; $\delta = 0^0$)	104
Figura 63: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 80^0$; $\delta = 30^0$)	105
Figura 64: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 80^0$; $\delta = 30^0$)	106
Figura 65: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 90^0$; $\delta = 0^0$)	106
Figura 66: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 90^0$; $\delta = 0^0$)	107
Figura 67: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 90^0$; $\delta = 30^0$)	108
Figura 68: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 90^0$; $\delta = 30^0$)	109
Figura 69: Espectro harmônico de corrente total/individual ($\alpha = 30^0$ e $\delta = 30^0$; $\alpha = 30^0$)	112
Figura 70: Espectro harmônico de corrente total/individual ($\alpha = 70^0$ e $\delta = 30^0$; $\alpha = 57,01^0$)	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ponte modificada controlada – tensão de saída x tiristores operantes	65
Tabela 2: Fator de potência e fator de deslocamento ($0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ e $\delta \geq 0^0$).....	110
Tabela 3: Fator de potência e fator de deslocamento ($30^0 < \alpha \leq 150^0$ e $\delta \geq 0^0$)	110
Tabela 4: Distorção harmônica total de corrente ($0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ e $\delta \geq 0^0$)	113
Tabela 5: Distorção harmônica total de corrente ($30^0 < \alpha \leq 150^0$ e $\delta \geq 0^0$)	114

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Ponte modificada controlada – circuito de potência	122
Anexo 2: Ponte modificada controlada – disparo principal.....	123
Anexo 3: Ponte modificada controlada – disparo auxiliar.....	123
Anexo 4: Ponte modificada controlada – tensão e corrente nos tiristores de fase	124
Anexo 5: Ponte modificada controlada – tensão e corrente nos tiristores de neutro	125
Anexo 6: Ponte modificada controlada – tensão e corrente de entrada/saída	125
Anexo 7: Ponte modificada controlada – tensão de entrada/saída.....	126
Anexo 8: Ponte modificada controlada – código Matlab / Simulink.....	127
Anexo 9: Ponte modificada semicontrolada – circuito de potência.....	127
Anexo 10: Ponte modificada semicontrolada – disparo principal	128
Anexo 11: Ponte modificada semicontrolada – tensão e corrente nos tiristores de fase	128
Anexo 12: Ponte modificada semicontrolada – tensão e corrente nos diodos de neutro	129
Anexo 13: Ponte modificada semicontrolada – tensão e corrente de entrada/saída.....	129
Anexo 14: Ponte modificada semicontrolada – tensão entrada/saída e diodos de neutro	130
Anexo 15: Ponte modificada semicontrolada – código Matlab / Simulink	130
Anexo 16: Ponte convencional – circuito de potência.....	131
Anexo 17: Ponte convencional – disparo principal	131
Anexo 18: Ponte convencional – tensão e corrente nos tiristores de fase.....	132
Anexo 19: Ponte convencional – tensão e corrente de entrada/saída	132
Anexo 20: Ponte convencional – tensão de entrada/saída	133
Anexo 21: Ponte convencional – código Matlab / Simulink	133

LISTA DE SÍMBOLOS

A – medidor digital de corrente em CC;
 $\cos \varphi_1$ – fator de deslocamento;
D7, D8 – diodo de neutro;
f – frequência;
 f_n – frequência harmônica de ordem “n”;
 $I_{saída}$ – corrente de saída em CC;
 I_n – valor eficaz da corrente de entrada à frequência de ordem n;
 I_{RMS} – valor eficaz da corrente de entrada;
 I_1 – valor eficaz da componente fundamental de corrente de entrada;
 I_a, I_b, I_c – corrente de entrada por fase em CA;
 $i_i(t)$ – corrente de entrada em função do tempo;
 I_0 – valor médio da corrente de saída em CC;
 I_N – corrente de neutro;
 I_P – módulo da corrente de pico em CA;
 $I_{T1}, I_{T2}, I_{T3}, I_{T4}, I_{T5}, I_{T6}$ – corrente no tiristor de fase;
 I_{T7}, I_{T8} – corrente no tiristor de neutro;
L – indutância;
n – ordem da frequência;
OSC-1, OSC-2 – osciloscópio;
P – potência ativa;
R – resistência elétrica;
S – potência aparente;
T – período;
T1, T2, T3, T4, T5, T6 – tiristor de fase;
T7, T8 – tiristor de neutro;
V – medidor digital de tensão em CC;
 V_0 – valor médio da tensão de saída em CC;
 V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} – tensão de entrada fase-fase em CA;
 V_{an}, V_{bn}, V_{cn} – tensão de entrada fase-neutro em CA;

$v_i(t)$ – tensão em função do tempo;

V_{Nn} – tensão nos terminais do tiristor de neutro T8;

V_P – módulo da tensão de pico fase-fase em CA;

V_{Pn} – tensão nos terminais do tiristor de neutro T7;

V_{PN} – tensão nos terminais de saída da ponte conversora;

V_{rms} – valor eficaz da tensão de entrada fase-neutro;

V_{RMS} – valor eficaz da tensão de entrada fase-fase;

α – ângulo de disparo dos tiristores de fase;

δ – ângulo de disparo dos tiristores de neutro;

φ – ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente;

φ_1 - ângulo de defasagem entre a corrente de entrada à frequência fundamental e a tensão de entrada à frequência fundamental.

LISTA DE ABREVIATURAS – TERMOS TÉCNICOS

AQE (AQE1, AQE2) – analisador de qualidade de energia;

AT – alta tensão;

CA – corrente alternada (da Língua Inglesa => AC – alternating current);

CC – corrente contínua (da Língua Inglesa => DC – direct current);

CCDA – circuito de controle de disparo auxiliar;

CCDP – circuito de controle de disparo principal;

DHT – distorção harmônica total (da Língua Inglesa => THD – total harmonic distortion);

DION – diodos de neutro;

FD – fator de deslocamento;

F_f – fator de forma;

FP – fator de potência;

MD1, MD2 – módulo de diodos;

MDS – módulo divisor de sinal;

TIRF – tiristores de fase;

TIRN – tiristores de neutro.

LISTA DE DEFINIÇÕES

- ✓ modo de operação 1 – bancada de teste operando como ponte modificada controlada, ou seja, operam os tiristores de fase, os tiristores de neutro, o circuito de controle de disparo principal e o circuito de controle de disparo auxiliar.
- ✓ modo de operação 2 – bancada de teste operando como ponte convencional, ou seja, operam os tiristores de fase e o circuito de controle de disparo principal.
- ✓ ponte convencional – ponte conversora trifásica CA-CC de 6 pulsos, configuração Graetz, provida de seis tiristores de fase e um circuito de controle de disparo principal.
- ✓ ponte modificada controlada – ponte conversora trifásica CA-CC de seis pulsos, provida de oito tiristores e dois circuitos de controle de disparo independentes, sendo seis tiristores de fase acionados pelo circuito de controle de disparo principal e dois tiristores de neutro acionados pelo circuito de controle de disparo auxiliar.
- ✓ ponte modificada semicontrolada – ponte conversora trifásica CA-CC de seis pulsos, provida de seis tiristores de fase, um circuito de controle de disparo principal e dois diodos de neutro.
- ✓ r_1 – intervalo de operação simultânea dos tiristores T1 e T6 durante o semi-ciclo positivo da corrente de entrada da fase A.
- ✓ r_2 – intervalo de operação simultânea dos tiristores T1 e T8 durante o semi-ciclo positivo da corrente de entrada da fase A.
- ✓ r_3 – intervalo de operação simultânea dos tiristores T1 e T2 durante o semi-ciclo positivo da corrente de entrada da fase A.
- ✓ r_4 – intervalo de operação simultânea dos tiristores T4 e T3 durante o semi-ciclo negativo da corrente de entrada da fase A.
- ✓ r_5 – intervalo de operação simultânea dos tiristores T4 e T7 durante o semi-ciclo negativo da corrente de entrada da fase A.
- ✓ r_6 – intervalo de operação simultânea dos tiristores T4 e T5 durante o semi-ciclo negativo da corrente de entrada da fase A.

1 INTRODUÇÃO

A energia disponibilizada pelo sistema elétrico não é totalmente aproveitada pela carga, parte se perde durante o processo de transmissão. Segundo E. Guardia (2010) [1], “A energia é um dos principais insumos da indústria e sua disponibilidade, custo e qualidade são determinantes fundamentais da capacidade competitiva do setor produtivo. Algumas medidas, como recontração de demanda, correção de reativos e instalação de cabines primárias para mudança de modalidade tarifária, têm como principal razão a redução dos custos com energia e não a economia de energia ou aumento da eficiência. Nestes casos, sugere-se que os investimentos partam do cliente e não de programas de eficiência energética financiados por programas governamentais. É importante reconhecer que, apesar de existirem setores e usos finais com maior atratividade para a implantação de projetos de racionalização energética, a correta administração dos recursos e sistemas energéticos nas empresas industriais constitui o elemento-chave para o sucesso efetivo desses projetos, alcançando redução permanente e competitiva das faturas de energia nos mais variados contextos. Nesse sentido, convém reiterar que não existem obstáculos técnicos relevantes para a promoção da eficiência energética, sendo o componente gerencial sempre o mais decisivo”.

De acordo com a Resolução Normativa ANEEL N^o 569 2013 [34], o fator de potência de referência, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido, para as unidades consumidoras do grupo A, o valor de 0,92; aos montantes de energia elétrica e demanda de potência reativos que excederem o limite permitido, aplicam-se cobranças estabelecidas, a serem adicionadas ao faturamento regular de unidades consumidoras do grupo A, incluídas aquelas que optarem por faturamento com aplicação da tarifa do grupo B, nos termos estabelecidos da resolução.

Com base nos parágrafos anteriores observa-se um compromisso do consumidor com os organismos governamentais que regem as regras de fornecimento de energia elétrica no país, bem como de não depender de incentivos e programas governamentais de eficiência energética para melhor aproveitar a energia disponível. Uma das maneiras de melhorar a eficiência energética é utilizar equipamentos que consomem menor energia elétrica reativa. Nesta linha de raciocínio, diversos estudos

são dedicados à melhoria do fator de potência em aplicações que utilizam conversores de energia elétrica que operam como retificador ou como inversor. Na literatura são mostrados trabalhos que utilizam conversores CA-CC bastante familiares à comunidade técnica e científica. Estes equipamentos, com pequenas variações em suas topologias do circuito de potência e do circuito de disparo, apresentam melhor fator de potência, ou seja, para uma mesma energia elétrica ativa requerida, necessita de menor energia elétrica reativa, que se caracteriza operar com um maior fator de potência.

O tema conversor CA-CC é bastante vasto, portanto, escolheu-se apresentar um estudo a respeito da ponte conversora trifásica CA-CC de oito tiristores e seis pulsos, aqui denominada de ponte modificada controlada, que é provida de oito tiristores e dois circuitos de controle de disparo independentes, sendo seis tiristores de fase acionados pelo circuito de controle de disparo principal e dois tiristores de neutro acionados pelo circuito de controle de disparo auxiliar.

O estudo da ponte modificada controlada nos permite explorar algumas lacunas que serviram de motivação para o desenvolvimento deste trabalho, como por exemplo: apresentação de uma topologia para o circuito de disparo auxiliar que permita compará-lo ao circuito de disparo principal; avaliação da complexidade do circuito de disparo auxiliar em relação ao circuito de disparo principal.

Neste CAPÍTULO será feita uma abordagem das referências bibliográficas que versam sobre os conceitos teóricos e de simulações digitais de ponte convencional, conceitos teóricos e de simulações digitais de ponte modificada controlada, aplicações da ponte convencional; aplicações da ponte modificada controlada, estudos comparativos da ponte convencional em relação à ponte modificada controlada, conceitos teóricos e de desenvolvimento de circuitos de controle de disparo de seis pulsos.

No CAPÍTULO 2 são abordadas as formas de onda e equações da ponte conversora CA-CC operando como ponte convencional, ponte modificada controlada e ponte modificada semicontrolada.

No CAPÍTULO 3 é apresentado um projeto de placa de controle eletrônica de seis pulsos e uma proposta do circuito de controle de disparo principal (CCDP) e do circuito de controle de disparo auxiliar (CCDA) da bancada de teste.

No CAPÍTULO 4 é apresentada a implementação da bancada de teste instrumentada e seus modos de operação.

No CAPÍTULO 5 é apresentado um estudo de caso, com as oscilografias de formas de onda, espectros harmônicos, bem como de ângulos de disparo e respectivas medições de grandezas elétricas da bancada de teste, operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional.

O CAPÍTULO 6 é dedicado à análise dos resultados teóricos e experimentais, oriundos do estudo de caso do CAPÍTULO 5.

O CAPÍTULO 7 é dedicado às conclusões finais.

No CAPÍTULO 8 são listadas as referências bibliográficas.

No CAPÍTULO 9 são apresentados os anexos do Matlab / Simulink e códigos que foram desenvolvidos para plotagem das formas de onda da ponte convencional, da ponte modificada semicontrolada e da ponte modificada controlada.

V.R. Stefanovic 1979 [2] apresenta a topologia do circuito de potência da ponte modificada controlada e da ponte convencional e faz uma análise comparativa entre ambas, apresentando conceitos teóricos primordiais para o desenvolvimento da bancada de teste e análise dos resultados experimentais, tais como: critério de ajuste da tensão média de saída CC; intervalos de ajuste dos ângulos de disparo; comportamento das formas de onda da tensão de saída CC; comportamento das formas de onda CA de corrente de fase e de corrente de neutro; comportamento da distorção harmônica de corrente; espectro harmônico de corrente; corrente de entrada eficaz; distorção harmônica de corrente; fator de potência; fator de deslocamento; fator de forma.

Um conceito de V.R. Stefanovic 1979 [2] bastante explorado nos experimentos com a bancada de teste é o intervalo de ajuste dos ângulos de disparo principal e auxiliar (α e δ) no funcionamento da ponte modificada, apresentando os seguintes comportamentos: a) no intervalo de $0 \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$, os tiristores de fase (T1, T2, T3, T4, T5, T6) operam e os tiristores de neutro (T7, T8) permanecem inoperantes; b) no intervalo de $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$, os tiristores de fase (T1, T2, T3, T4, T5, T6) e os tiristores de neutro (T7, T8) operam. Para o caso particular de ângulo de disparo auxiliar $\delta = 0^\circ$, a ponte modificada controlada funciona como ponte modificada

semicontrolada e os tiristores de neutro (T7, T8) operam como se fossem diodos de neutro.

Segundo V.R. Stefanovic 1979 [2], os conversores convencionais de fase comutada totalmente controlados são notórios pelo fator de potência de linha reduzido com tensões de saída reduzidas. Com a filtragem ideal no lado de corrente contínua e a impedância de saída da fonte de corrente alternada conectada igual a zero, o fator de potência do conversor é aproximadamente igual ao cosseno do ângulo de disparo, porém na prática, há sempre alguns harmônicos no lado de corrente contínua. Além disso, as fontes de corrente alternada nunca são ideais, e a sobreposição de comutação, causada pelas reatâncias de dispersão do transformador, não pode ser desprezada e por consequência, o fator de potência do conversor reduz ainda mais.

De acordo com o IEEE IAS Static Power Converter Committee 1977 [3], apud V.R. Stefanovic 1979 [2], existem vários métodos para melhoria do fator de potência, variando desde filtros capacitivos até condensadores síncronos. No entanto, normalmente, tenta-se minimizar a necessidade de equipamentos de correção externa conectando e operando conversores para reduzir a necessidade de energia reativa.

Segundo E. Uhlmann 1937 [4], G. Moltgen 1958 [5] e J. Koehn 1958 [6], apud V.R. Stefanovic 1979 [2], um dos métodos mais comuns de reduzir a potência reativa consumida pelo conversor consiste em operá-lo como retificador semicontrolado, como por exemplo, a ponte trifásica configuração Graetz, operando como retificador semicontrolado, na qual são substituídos os tiristores inferiores (T2, T4, T6) por diodos (D2, D4, D6). Se a ponte conversora trifásica configuração Graetz, operar como inversor, será necessário disparar os tiristores superiores (T1, T3, T5) e os tiristores inferiores (T2, T4, T6) por dois circuitos de disparo independentes, um para os tiristores superiores e outro para os tiristores inferiores.

De acordo com W. McMurray 1976 [7], o baixo fator de potência dos conversores controlados por fase, quando a tensão de saída é menor que a máxima, é preocupante em equipamentos de alta potência. Em um conversor controlado por fase que consiste em dois grupos de comutação em cascata (exemplo: duas pontes conversoras, conforme a mostrada na Figura 1, em cascata), o fator de potência, geralmente baixo, pode ser aumentado, disparando ou bloqueando os tiristores nos

dois grupos assimetricamente, ou seja: o ângulo de disparo dos tiristores de um dos grupos é totalmente avançado ou retardado para minimizar o consumo de potência reativa, enquanto o ângulo de disparo dos tiristores do outro grupo é controlado para fornecer a tensão de saída CC desejada. Esta técnica não é recomendada para pontes conversoras trifásicas de três tiristores, devido à ondulação de saída do terceiro harmônico, à distorção da corrente de linha de segundo harmônico e ao risco de falha na comutação. Essas objeções podem ser superadas pela combinação de pares de pontes conversoras trifásicas, porém se a regeneração não é necessária, metade dos tiristores podem ser substituídos por diodos, reduzindo o custo (ver Figura 1 e Figura 2). O método deve aumentar o fator de potência de cicloconversores de acionamento de motores CA, também, o acionamento de motores CC.

Segundo W. McMurray 1976 [7], quando o disparo assimétrico é aplicado a uma ponte conversora trifásica como a mostrada na Figura 1 e acrescida de reatâncias de entrada substancialmente independentes, provida de dois circuitos de disparo independentes, um circuito para o disparo dos tiristores superiores (T1, T3, T5) e outro circuito para disparo dos tiristores inferiores (T4, T6, T2), algumas desvantagens são apresentadas, tais como: a) ondulação de terceiro harmônico e de sexto harmônico na saída, porém menor que a da ponte conversora de três pulsos; b) mesmos harmônicos presentes na saída e nas correntes da entrada; c) para duas regiões de tensão de saída específicas, há interferência entre as comutações dos dois grupos de comutação através do transformador e da reatância de entrada, semelhante ao que ocorre em um conversor de ponte trifásica simetricamente disparada quando o ângulo de comutação é superior a 60° provocando a sobreposição de comutação.

Na Figura 1 é mostrado o circuito de potência da ponte conversora trifásica configuração Graetz - controlada.

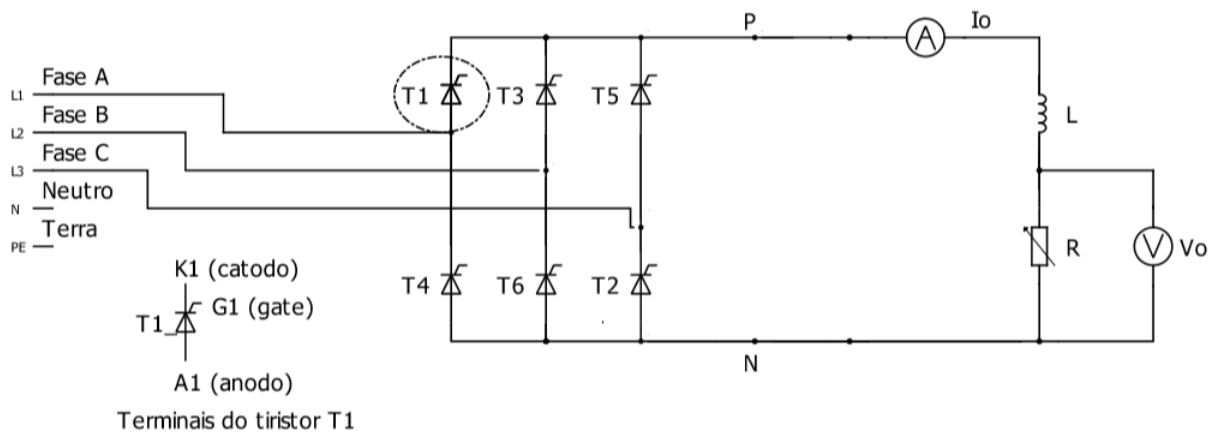


Figura 1: Ponte conversora trifásica configuração Graetz – controlada (adaptado de [2], [5-7])

Substituindo os tiristores inferiores (T4, T6, T2) da ponte conversora da Figura 1, por diodos (D4, D6, D2), tem-se o circuito de potência da ponte semicontrolada mostrada na Figura 2.

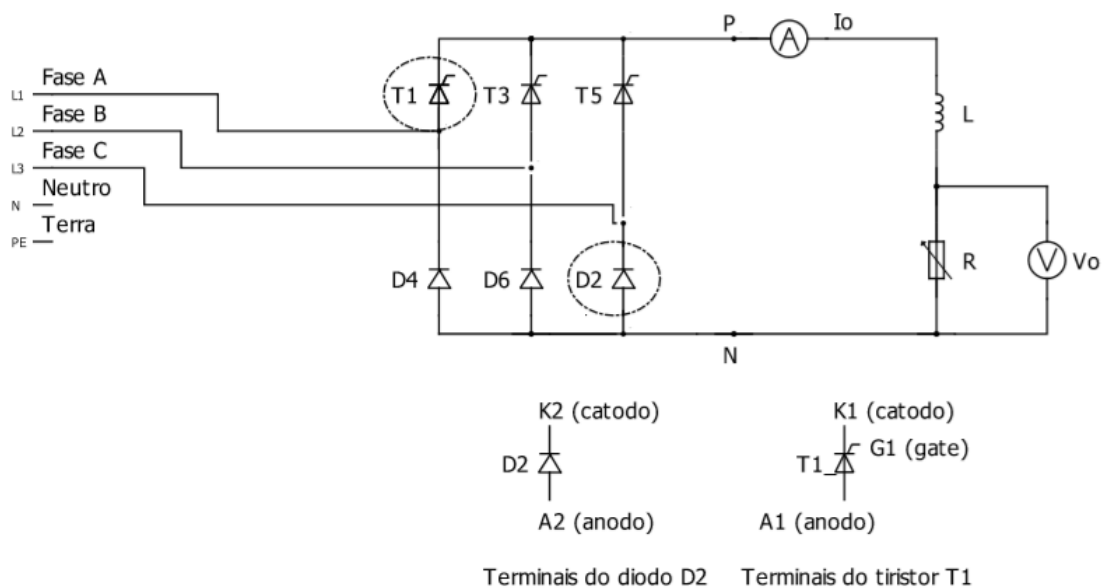


Figura 2: Ponte conversora trifásica configuração Graetz – semicontrolada (adaptado de [2], [5-7])

Conforme descreve F. Busemann 1958 [8] e V.P. Bakharerskii 1957 [9], apud V.R. Stefanovic 1979 [2], pode-se utilizar a ponte modificada controlada de comutação forçada para aumentar o fator de potência. Esta ponte se refere a ponte modificada controlada (ver Figura 3), pauta do nosso trabalho, acrescida de um capacitor em série com o condutor neutro e conectada ao ponto comum dos tiristores de neutro, conforme mostrado na Figura 4. O método da comutação forçada é aplicado em conversores de

alta potência, basicamente estações CC-AT e se as aplicações permitirem, o fator de potência pode ser aumentado substancialmente.

Na Figura 3 é mostrado circuito de potência da ponte conversora trifásica modificada controlada, configuração Graetz pautada deste trabalho.

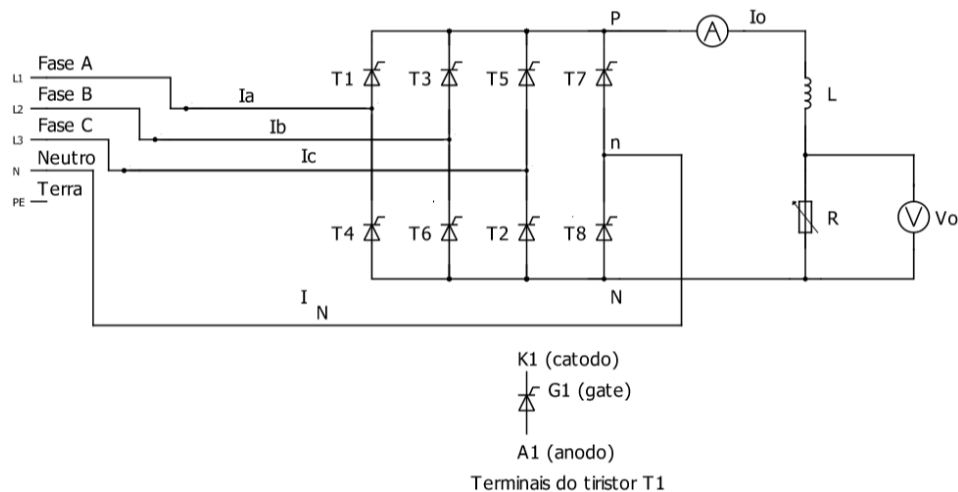


Figura 3: Ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz – controlada (adaptado de [2], [9-10])

Da mesma forma, adicionando um capacitor entre o neutro do sistema de alimentação de potência e o ponto “n” da ponte conversora modificada da Figura 3 tem-se o método da comutação forçada que é mostrado na Figura 4.

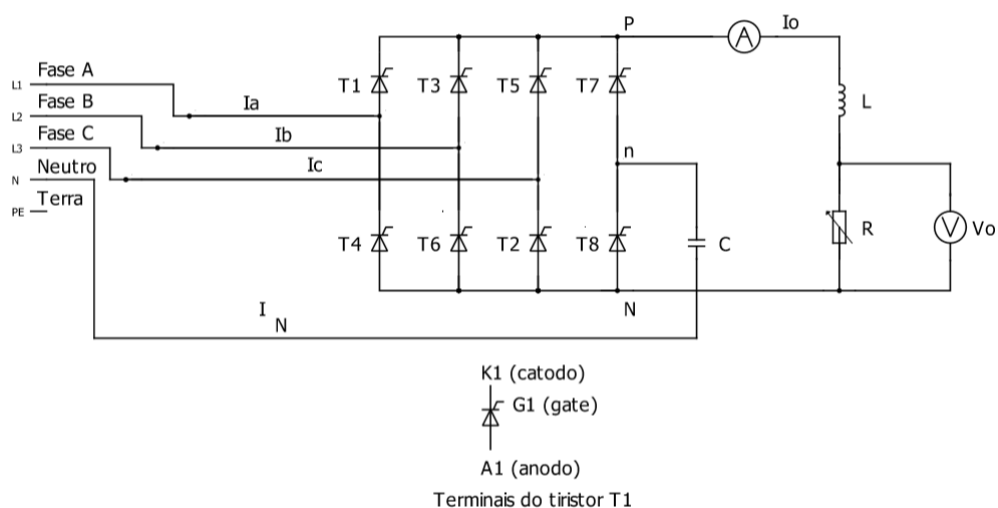


Figura 4: Ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz – comutação forçada (adaptado de [2])

Outras configurações de conversor com ou sem comutação forçada foram propostas mais tarde por T. Ohnishi 1977 [10], F. Harashima 1976 [11], T. Kataoka

1977 [12] e J.R. Sylvester 1977 [13], apud V.R. Stefanovic 1979 [2]; essas configurações são geralmente limitadas a acionamentos de motores de baixa e média potência pelo tamanho prático dos componentes adicionados para a melhoria do fator de potência.

V.R. Stefanovic 1979 [2] propôs, em análise detalhada, a utilização de um conversor comutado de fase de seis pulsos modificado (seis tiristores de fase e dois tiristores de neutro). O conversor modificado opera com uma potência reativa substancialmente reduzida com tensões CC reduzidas e é capaz de retificar e inverter. Se a aplicação não requerer operar como inversor, os tiristores de neutro podem ser substituídos por diodos.

Com base no parágrafo anterior, considerando que a ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz controlada, apresentada na Figura 3, opera apenas como ponte retificadora, os tiristores de neutro (T7, T8) podem ser substituídos por diodos de neutro (D7, D8), e esta configuração é apresentada na Figura 5.

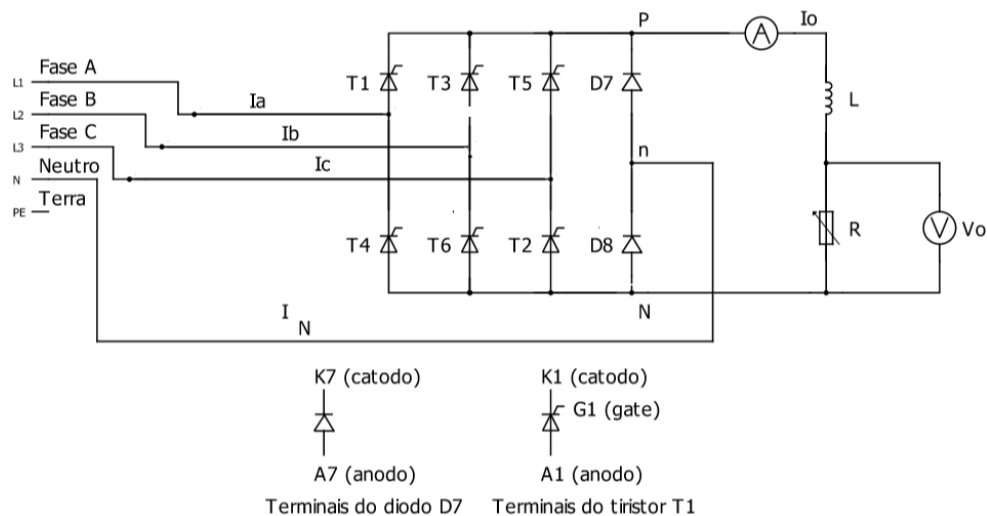


Figura 5: Ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz – semicontrolada (adaptada de [2])

Segundo V.R. Stefanovic 1979 [2], os elementos básicos do método apresentado, para aumentar o fator de potência, foram primeiramente sugeridos por E. Uhlmann 1933 [14] para um retificador de arco de mercúrio monofásico controlado por rede e foram implementados por Hermle 1937 [15] em uma locomotiva elétrica monofásica de 50 Hz.

Conforme V.R. Stefanovic 1979 [2], B.R. Pelly 1971 [16] combinando duas pontes de três pulsos com diodos de roda livre (free wheeling diodes), obteve um conversor trifásico, com os tiristores de neutro (T7, T8) substituídos por diodos (D7, D8) conforme mostrado na Figura 5; em sequência B.R. Pelly 1971 [16] analisou a operação de um retificador assim obtido para uma fonte CA ideal e corrente de carga CC constante; e finalmente, R. Jotten 1977 [17] apresentou o circuito mostrado na Figura 3, mas não o analisou.

V.R. Stefanovic 1979 [2] apresenta a análise teórica da ponte conversora trifásica modificada, para os modos de retificação e de inversão e para casos de sobreposição ideal de fonte CA e de comutação. A análise indica que a ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz - controlada apresenta vantagens sobre uma ponte conversora trifásica configuração Graetz controlada de seis pulsos ou ponte convencional, tais como: menor conteúdo harmônico no lado CC; menor necessidade de potência reativa, especialmente em tensões CC reduzidas; menor corrente eficaz de linha com potência de saída reduzida. Em contrapartida, a ponte conversora apresenta desvantagens, tais como: geralmente maior distorção harmônica no lado CA; controle de disparo complexo; custo adicional de dois tiristores auxiliares. As vantagens e desvantagens aqui apresentadas são pontos importantes na avaliação do comportamento da bancada de teste funcionando como ponte modificada controlada e como ponte convencional.

Baseado na teoria de V.R. Stefanovic 1979 [2], G. Olivier 1982 [18] implementou uma fonte de corrente de oito tiristores (ver Figura 3), utilizando os tiristores de neutro para transferir a corrente de carga para o condutor neutro toda vez que a tensão e a corrente em uma fase tende a ter sinais opostos se operar como retificador, ou toda vez que a tensão e a corrente em uma fase tende a ter o mesmo sinal se operar como inversor. A implementação da fonte de corrente de oito tiristores permite a redução da corrente de entrada e o aumento do fator de potência, podendo operar no modo retificador com resposta similar à da ponte modificada semicontrolada (ver Figura 5), tendo como diferencial, a possibilidade de operar também no modo inversor.

G. Olivier 1983 [19] implementou três pontes tiristorizadas diferentes aplicadas ao controle de escorregamento de um motor de indução, a primeira de seis tiristores

(configuração Graetz mostrada na Figura 3), a segunda de sete tiristores (configuração Graetz acrescida de um tiristor em paralelo com os tiristores de fase) e a terceira de oito tiristores (configuração Graetz acrescida de dois tiristores de neutro em série conectados em paralelo com os tiristores de fase). Os desempenhos das topologias foram avaliados experimentalmente em relação ao fator de potência de entrada, eficiência, corrente de entrada total, tamanho do indutor de ligação em CC e regulação; os melhores resultados foram obtidos com a topologia de oito tiristores, a segunda melhor opção foi obtida com a topologia de sete tiristores e os resultados menos favoráveis foram obtidos com a topologia de seis tiristores.

P.P.A. Caldeira 1988 [20] analisa o fator de potência em sistemas retificadores trifásicos utilizados em plataformas de perfuração de petróleo e apresenta modelos matemáticos para o conversor convencional e para o conversor modificado semicontrolado da proposição de V.R. Stefanovic 1979 [2], acrescido de capacitores fixos, como solução para melhorar o fator de potência nestes sistemas. Desta forma, tem-se como vantagens: a economia de combustível e em manutenção; a possibilidade de desligamento de motores; a melhoria nas características de carga do motor a diesel; a aplicação de uma solução simples para resolver os problemas oriundos da alta geração de harmônicos e do baixo fator de potência, quando operando com ângulos de disparo altos. A aplicação do conversor modificado semicontrolado, equivale a abordagem do caso particular da bancada de teste operando como ponte modificada controlada com ângulo de disparo auxiliar $\delta = 0^\circ$.

A.J.J. Rezek 1990 [21] desenvolveu um programa para simulação digital de formas de onda e outro programa para cálculos. O programa de simulação digital traça as formas de onda de tensão e de corrente de saída da ponte modificada controlada da Figura 3 com disparo de seis pulsos e para a associação de duas pontes modificadas da Figura 3 com disparo de doze pulsos, permitindo comparar estas formas de onda com as formas de onda da ponte convencional para diferentes ângulos de disparo dos tiristores de fase e dos tiristores de neutro; o programa de cálculo, com base na transformada rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transformer), permite comparar os resultados de corrente de alimentação e de fator de potência entre a ponte modificada controlada de seis pulsos, ponte modificada controlada de 12 pulsos e ponte convencional. Esta referência foi utilizada na

validação das simulações feitas no Matlab / Simulink e para analisar as formas de onda e espectros harmônicos oriundas dos experimentos com a bancada de teste.

J.R. Cogo 1985 [22] desenvolveu uma bancada de teste para fins didáticos, para realizar testes experimentais de um sistema de transmissão de corrente contínua HVDC de doze pulsos. Os conversores CA-CC de doze pulsos da bancada de testes podem ser obtidos da associação de dois conversores CA-CC de seis pulsos, assim como os conversores CC-CA de doze pulsos da bancada de testes são obtidos com base na associação de dois conversores CC-CA de seis pulsos, Os disparos dos conversores CA-CC e CC-CA da bancada de testes são feitos por um circuito de disparo de tiristores de seis pulsos desenvolvido com circuito integrado TCA780. O desenvolvimento ajuda a entender o circuito de controle de disparo da bancada de teste.

J.R. Cogo 1982 [23] desenvolveu um circuito de disparo de tiristores de seis pulsos com base no circuito integrado TCA 780, para pontes tiristorizadas trifásicas semicontroladas ou totalmente controladas. Este desenvolvimento pode ser utilizado para acoplamento a circuitos de controle de tensão, corrente ou velocidade, em acionamento de máquinas elétricas. O desenvolvimento ajuda a entender o circuito de controle de disparo da bancada de teste.

J.A. Pomílio 2019 [24] faz uma revisão de alguns conceitos básicos da ponte convencional controlada e não controlada, considerando diversas topologias e suas equações básicas. Estes conceitos serão utilizados avaliar o comportamento da bancada de teste operando como ponte convencional.

J.M. Schaefer 1965 [25] apresenta diversas configurações de conversores CA-CC operando com diferentes tipos de cargas, dentre elas a ponte convencional e respectivas equações. Ressalta-se o uso das equações de Schaefer para avaliar medições experimentais da bancada de teste operando como ponte convencional.

Y.R. de Souza 2014 [26], descreve a sequência de chaveamento dos tiristores da ponte conversora de 6 pulsos, configuração Graetz, e salienta sobre o efeito da comutação quando da alternância de fase. O efeito da comutação é de grande valia na avaliação do circuito de disparo dos tiristores da bancada de teste, para assegurar que não ocorrerá sobreposição de disparo.

G.R.S. Mendonça 2002 [27] apresenta o diagrama detalhado do circuito da placa eletrônica de 6 pulsos. A placa dispõe de quatro estágios com as funções de controle o disparo, ajuste de largura de pulso, isolamento do circuito elétrico e geração de sinal de disparo dos tiristores da ponte convencional. A placa eletrônica foi a base do circuito de disparo principal e auxiliar da bancada de teste.

M.C. Cardoso 2016/2017 [28] descreve o circuito de controle de disparo e o circuito de isolamento galvânico opto acoplador, base da placa eletrônica de G.R.S. Mendonça 2002 [27]. A SIEMENS 2018 [29] apresenta uma versão evoluída do circuito de controle de disparo de M.C. Cardoso 2016/2017 [28]. N.C. Braga 2016 [30] mostra a configuração monoestável de ajuste de largura de pulso, base da placa eletrônica de G.R.S. Mendonça 2002 [27].

V.Z. Silva 2018 [31] descreve o funcionamento de uma placa eletrônica de disparo de seis pulsos, desenvolvida com base no TCA 780. São apresentados os conceitos, otimizações e relevâncias da aplicação para disparo de tiristores. São apresentadas algumas vantagens da utilização do TCA 780, tais como a redução do tamanho e a melhoria de confiabilidade do circuito de controle da placa eletrônica. Esta referência ajudou no entendimento do circuito de disparo base da bancada de teste de G.R.S. Mendonça 2002 [27].

Com base nos conhecimentos apresentados nos parágrafos anteriores, M.L. Ramos 2017 [32] propõe a implementação em laboratório de uma ponte modificada controlada, base do tema desta dissertação, acionada por circuitos de disparo independentes concebidos a partir da placa eletrônica de 6 pulsos de G.R.S. Mendonça 2002 [27].

M.L. Ramos 2020 [33], considerando a abordagem dos próximos CAPÍTULOS, discorre sobre o desenvolvimento e implementação da topologia de operação dos circuitos de disparo dos tiristores de fase e de neutro, a configuração da bancada de teste para operar como ponte modificada controlada e como ponte convencional, testes e avaliação dos resultados experimentais da bancada de teste frente aos conceitos teóricos e das simulações digitais das referências bibliográficas.

2 PONTE CONVERSORA

2.1 Geral

V.R. Stefanovic 1979 [2] apresentou análise teórica para a ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz controlada, operando como retificador e operando como inversor. Nos tópicos adiante, serão feitas algumas considerações de casos de configurações de pontes conversoras, operando como retificador, que serão importantes na compreensão do funcionamento da ponte conversora modificada controlada e semicontrolada, objeto deste trabalho, operando como ponte retificadora, dentre elas, cita-se:

- a) ponte conversora trifásica, configuração Graetz controlada;
- b) ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz semicontrolada;
- c) ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz controlada.

Nestes tópicos será feito um parêntese, principalmente no que se refere ao funcionamento e às formas de onda de tensão e de corrente, esperadas para os circuitos de saída das cargas elétricas, deixando para as seções adiante, a proposição de um sistema de controle para a ponte conversora modificada controlada operando como ponte retificadora, bem como a sua implementação e estudos de caso, para comparar com as bases teóricas, como as apresentadas por V.R. Stefanovic 1979 [2], J.A. Pomílio 2019 [24], J.M. Schaefer 1965 [25], G. Olivier 1982 [18] e as simulações teóricas digitais de A.J.J. Rezek 1990 [21].

Para o sistema elétrico nacional a tensão é senoidal, periódica e de frequência nominal constante 60Hz. Abaixo seguem algumas equações básicas e parâmetros do sistema elétrico:

Relação entre o período e a frequência:

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Forma de onda de tensão em CA:

$$v_i(t) = V_p \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

Relação entre tensão eficaz fase-fase e tensão de pico:

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Relação entre tensão eficaz fase-neutro e tensão eficaz fase-fase:

$$V_{rms} = \frac{V_{RMS}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

Forma de onda de corrente em CA:

$$i_i(t) = I_p \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (5)$$

O fator de potência é dado pela relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) consumidas pela carga, quaisquer que sejam as formas de onda de tensão e de corrente apresentada pela carga, desde que, as formas de onda, sejam periódicas no tempo, conforme J.A. Pomílio 2019 [24].

A equação geral do fator de potência é dada pela equação:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int v_i(t) \times i_i(t) dt}{V_{RMS} \times I_{RMS}} \quad (6)$$

2.2 Ponte conversora trifásica configuração Graetz controlada

2.2.1 Geral

A ponte conversora trifásica configuração Graetz controlada, operando como ponte retificadora, ou simplesmente ponte convencional, conforme mostrado na Figura 6, é um equipamento composto por um circuito de disparo (disparo principal) e seis tiristores de fase (T1, T2, T3, T4, T5, T6), sendo três tiristores de fase superiores (T1, T3, T5) e três tiristores de fase inferiores (T4, T6, T2). O circuito de disparo dos tiristores de fase opera, de forma que:

- a) Em operação normal, simultaneamente funcionam dois tiristores, um tiristor superior e um tiristor inferior (T1 + T2 ou T2 + T3 ou T3 + T4 ou T4 + T5 ou T5 + T6 ou T6 + T1).
- b) Em operação de comutação, simultaneamente funcionam três tiristores (T1 + T2 + T3 ou T2 + T3 + T4 ou T3 + T4 + T5 ou T4 + T5 + T6 ou T5 + T6 + T1 ou T6 + T1 + T2).

Os tiristores de fase operam pelo circuito de disparo principal. Para cada tiristor é aplicado um sinal de disparo nos terminais gate-catodo (ex.: para o tiristor T1 é aplicado um sinal de disparo nos terminais G1-K1). Os tiristores operam desde que simultaneamente:

- a) Para cada tiristor, a tensão entre os terminais anodo-catodo, seja positiva.

- b) Seja aplicado um sinal de disparo entre os terminais gate-catodo, de cada tiristor, controlada pelo circuito de disparo do tiristor de fase (disparo principal).
- c) O ângulo de disparo “ α ” indica o momento em que é iniciada a condução da corrente no conversor, considerando que o tiristor está diretamente polarizado; a condução de corrente no tiristor é interrompida quando o ângulo de disparo é interrompido e o tiristor não está mais polarizado diretamente.

Neste documento, a ponte conversora trifásica controlada configuração Graetz de seis pulsos, operando como retificador, mostrada na Figura 6, será chamada simplificada de ponte convencional.

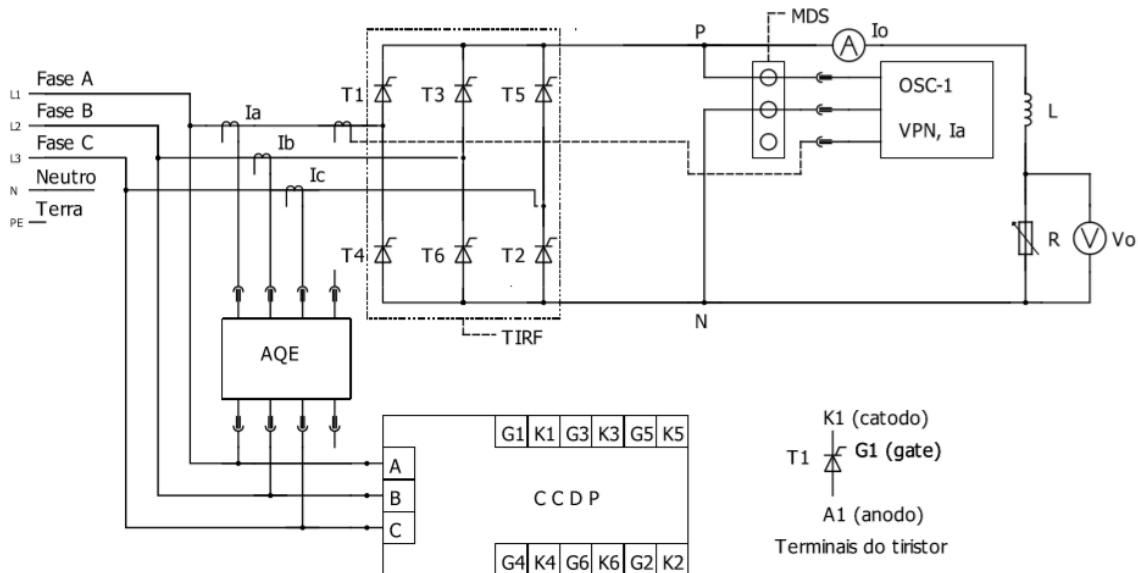


Figura 6: Ponte convencional (adaptado de [2], [5-7])

2.2.2 Formas de onda de entrada e de saída da ponte convencional

2.2.2.1 Carga puramente resistiva para $\alpha = 0^\circ$

Para a ponte convencional da Figura 6, considerando uma carga elétrica puramente resistiva, ou seja, $R > 0$ e $L = 0$, a forma de onda da corrente de entrada é quadrada com ondulações na parte superior, conforme mostrado na Figura 7. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 16, Anexo 17, Anexo 18, Anexo 19, Anexo 20 e Anexo 21).

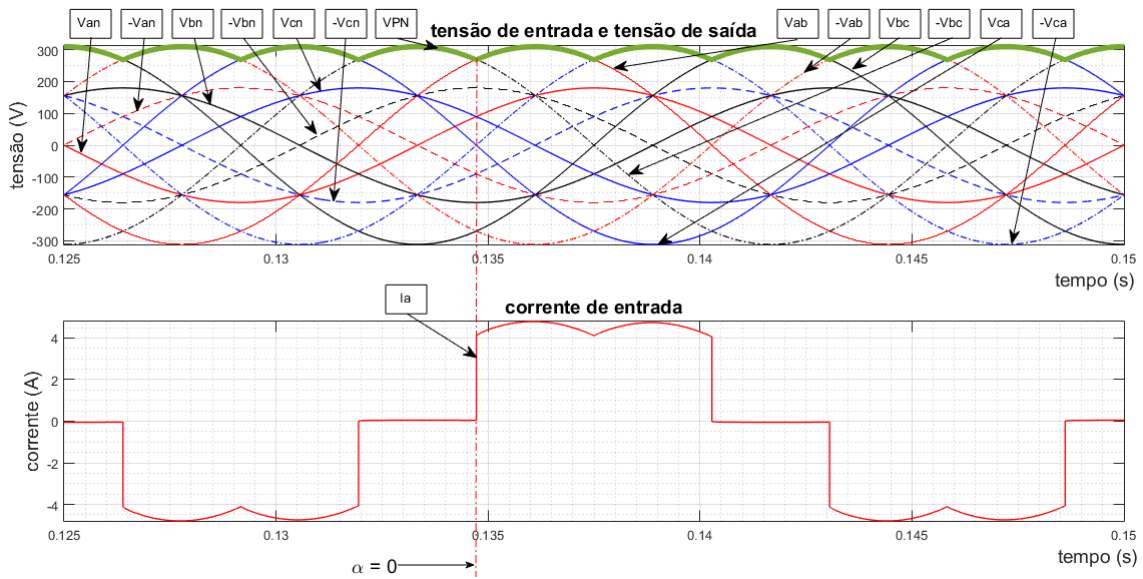


Figura 7: Ponte convencional – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga puramente resistiva (adaptado de [24])

2.2.2.2 Carga parte resistiva e parte indutiva para $\alpha = 0^\circ$

Para a ponte convencional da Figura 6, considerando uma carga elétrica, parte resistiva e parte indutiva, ou seja, $R > 0$ e $L > 0$, a forma de onda da corrente de entrada é quadrada com menores ondulações na parte superior, se assemelhando a uma reta, quanto maior for a indutância “L”, conforme mostrado na Figura 8. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 16, Anexo 17, Anexo 18, Anexo 19, Anexo 20 e Anexo 21).

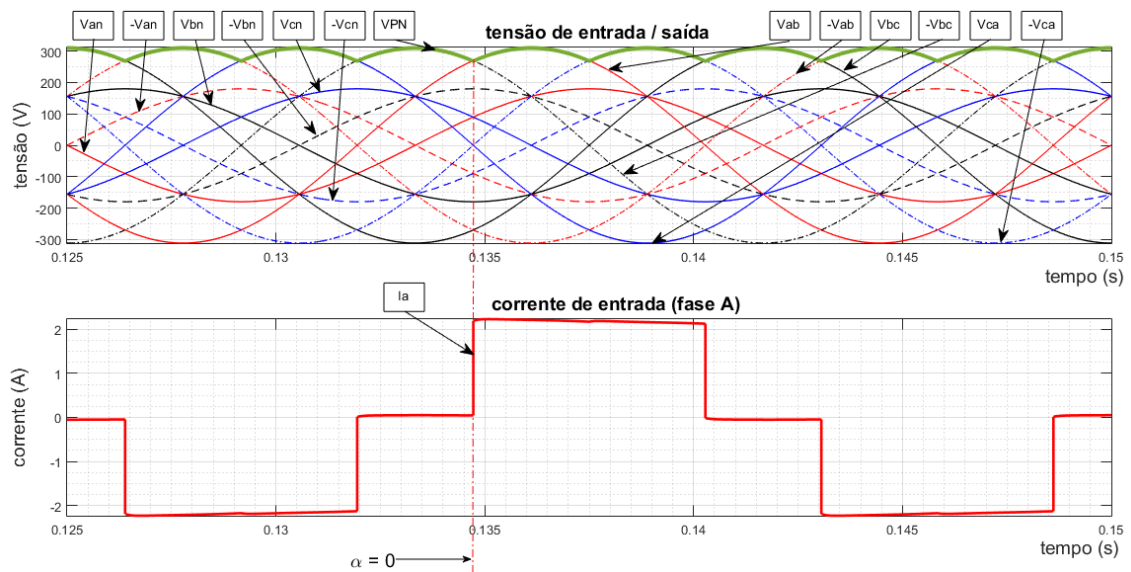


Figura 8: Ponte convencional – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $\alpha = 0^\circ$ (adaptado de [24])

2.2.2.3 Carga parte resistiva e parte indutiva para $\alpha > 0^\circ$

Para a ponte convencional da Figura 6, considerando uma carga elétrica, parte resistiva e parte indutiva, ou seja, $R > 0$ e $L > 0$, a forma de onda da corrente de entrada é quadrada com menores ondulações e com a parte superior se assemelhando a uma reta, quanto maior for a indutância “L”, conforme mostrado na Figura 9. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 16, Anexo 17, Anexo 18, Anexo 19, Anexo 20 e Anexo 21).

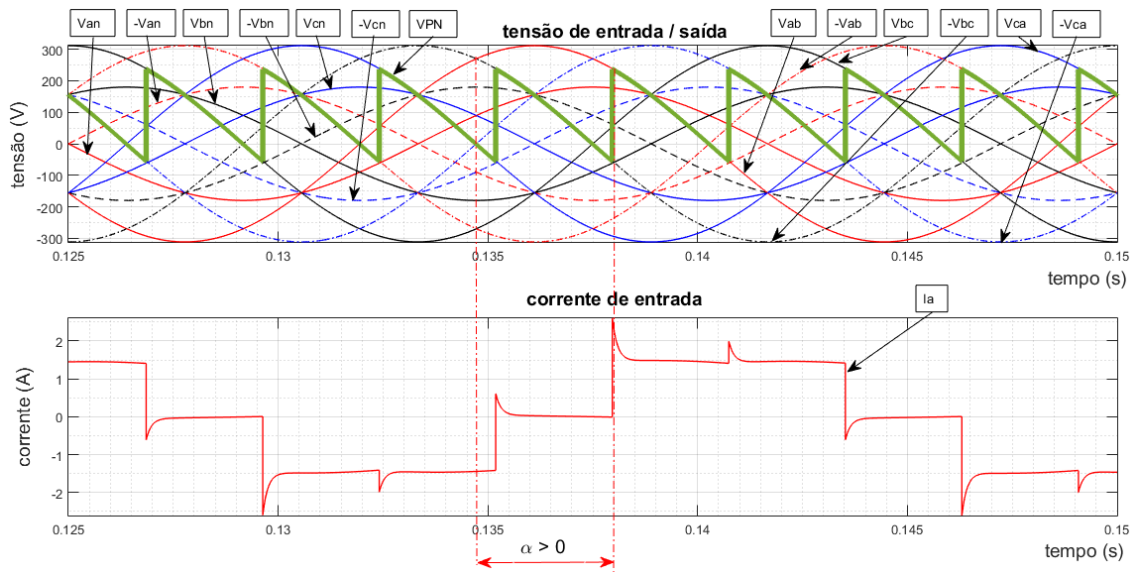


Figura 9: Ponte convencional – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $\alpha > 0^\circ$ (adaptado de [24])

2.2.3 Equações da ponte convencional

2.2.3.1 Geral

A corrente eficaz de entrada é dada pela equação:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{(I_1)^2 + \sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2} \quad (7)$$

A relação entre os valores eficazes da corrente fundamental e de corrente de entrada é denominada fator de forma, dado pela equação:

$$F_f = \frac{I_1}{I_{\text{RMS}}} \quad (8)$$

A relação entre o valor eficaz das correntes harmônicas e o valor eficaz da corrente fundamental é denominada de taxa de distorção harmônica e dada pela equação:

$$\text{DHT} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2}}{I_1} \quad (9)$$

2.2.3.2 Equação do fator de potência

Para um sistema elétrico com formas de onda senoidais, a equação (6) é igual ao cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente (φ). Substituindo as

formas de onda de tensão e de corrente, instantânea e eficaz, na equação (6), o fator de potência é:

$$FP = \cos(\varphi) = \cos(\varphi_1) \quad (10)$$

Para o sistema elétrico com forma de onda de tensão senoidal e forma de onda de corrente não senoidal, o fator de potência é:

$$FP = \cos(\varphi) = \frac{I_1}{I_{RMS}} \times \cos(\varphi_1) \quad (11)$$

O cosseno do ângulo entre a tensão de entrada e a corrente fundamental é denominado fator de deslocamento, ou seja:

$$FD = \cos(\varphi_1) \quad (12)$$

Rearranjando as equações (7) e (9) e substituindo na equação (11), o fator de potência pode ser escrito pela equação:

$$FP = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1+(DHT)^2}} \quad (13)$$

O fator de potência em função do ângulo de disparo é:

$$FP = \frac{3}{\pi} \cos(\alpha) \quad (14)$$

2.2.3.3 Equação da tensão média de saída em CC

A tensão média de saída em CC da ponte conversora controlada, em função do ângulo de disparo, é dada pela equação:

$$V_0 = \frac{1}{T_{S_0}} \int_{\alpha+T_{S_0}}^{\alpha+T_{S_f}} V_P \times \sin(\theta) d\theta \quad (15)$$

Considerando que a forma de onda do sistema elétrico de alimentação da ponte convencional é senoidal, de período $T = 2\pi = 360^\circ$, então, o período da forma de onda da tensão de saída da ponte convencional (6 pulsos) é $T_s = \frac{T}{6} = \frac{\pi}{3} = 60^\circ$, ou seja:

$$T_s = T_{S_f} - T_{S_0} = \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{3} = \frac{\pi}{3} = 60^\circ \quad (16)$$

Substituindo (16) em (15), a tensão na saída da ponte convencional é:

$$V_0 = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+\frac{\pi}{3}}^{\alpha+\frac{2\pi}{3}} V_P \times \sin(\theta) d\theta = \frac{3}{\pi} \cdot V_P \cdot \cos(\alpha) \quad (17)$$

A tensão média em CC na saída da ponte convencional em função da tensão eficaz fase-fase é:

$$V_0 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \int_{\alpha+\frac{\pi}{3}}^{\alpha+\frac{2\pi}{3}} V_{\text{RMS}} \times \sin(\theta) d\theta = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{\text{RMS}} \cdot \cos(\alpha) \quad (18)$$

2.3 Ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz semicontrolada

2.3.1 Geral

A ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz semicontrolada, operando como retificador, conforme mostrado na Figura 10, é um equipamento alimentado por um sistema elétrico trifásico a 4 fios, composto por um circuito de disparo, seis tiristores de fase (T1, T2, T3, T4, T5, T6), sendo três tiristores superiores (T1, T3, T5) e três tiristores inferiores (T4, T6, T2), acrescidos de dois diodos de neutro (D7, D8).

Neste documento, a ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz semicontrolada de seis pulsos, operando como ponte retificadora, mostrada na Figura 10, será chamada simplifcadamente de ponte modificada semicontrolada.

O circuito de disparo dos tiristores de fase opera, de forma que:

- a) Em operação normal, simultaneamente funcionam dois tiristores de fase, sendo um tiristor superior e um tiristor inferior (T1 + T2 ou T2 + T3 ou T3 + T4 ou T4 + T5 ou T5 + T6 ou T6 + T1).
- b) Em operação de comutação, simultaneamente funcionam três tiristores de fase (T1 + T2 + T3 ou T2 + T3 + T4 ou T3 + T4 + T5 ou T4 + T5 + T6 ou T5 + T6 + T1 ou T6 + T1 + T2).

Os diodos de neutro operam da seguinte forma:

- a) O diodo de neutro superior (D7) entra em operação quando os tiristores de fase superiores (T1, T3, T5) estão inoperantes.
- b) O diodo de neutro inferior (D8) entra em operação quando os tiristores de fase inferiores (T4, T6, T2) estão inoperantes.
- c) Os diodos de neutro entram em operação no período de $30^\circ < a \leq 150^\circ$.

Os tiristores de fase operam pelo circuito de disparo principal. Para cada tiristor é aplicado um sinal de disparo nos terminais gate-catodo (ex.: para o tiristor T1 é

aplicado um sinal de disparo nos terminais G1-K1). Os tiristores operam desde que simultaneamente:

- Para cada tiristor, a tensão entre os terminais anodo-catodo, seja positiva.
- Seja aplicado um sinal de disparo nos terminais gate-catodo, de cada tiristor, controlado pelo circuito de disparo do tiristor.
- O ângulo de disparo " α " indica o momento em que é iniciada a condução da corrente no conversor, considerando que o tiristor está diretamente polarizado; a condução de corrente no tiristor é interrompida quando o ângulo de disparo está interrompido e o tiristor não está mais polarizado diretamente.

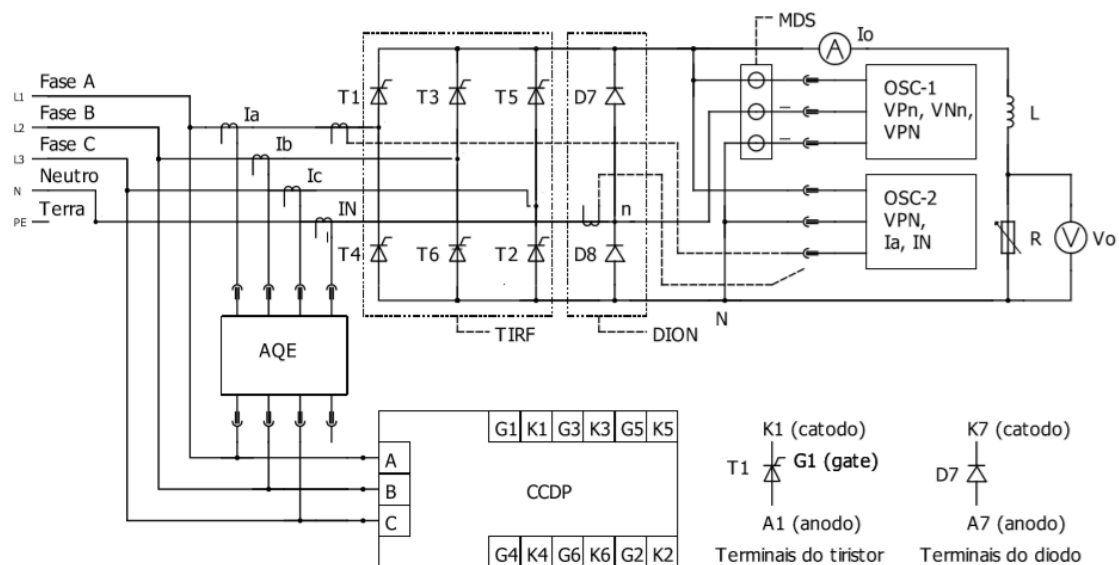


Figura 10: Ponte modificada semicontrolada (adaptado de [2])

2.3.2 Formas de onda de entrada e de saída da ponte modificada semicontrolada

2.3.2.1 Carga puramente resistiva para $\alpha = 0^\circ$

Para a ponte modificada semicontrolada da Figura 10, considerando uma carga elétrica puramente resistiva, ou seja, $R > 0$ e $L = 0$: a forma de onda da corrente de entrada de fase é quadrada com ondulações na parte superior, conforme mostrado na Figura 11, para ângulo de disparo $\alpha = 0^\circ$; a forma de onda da corrente de entrada de

neuro é zero. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 9, Anexo 10, Anexo 11, Anexo 12, Anexo 13, Anexo 14 e Anexo 15).

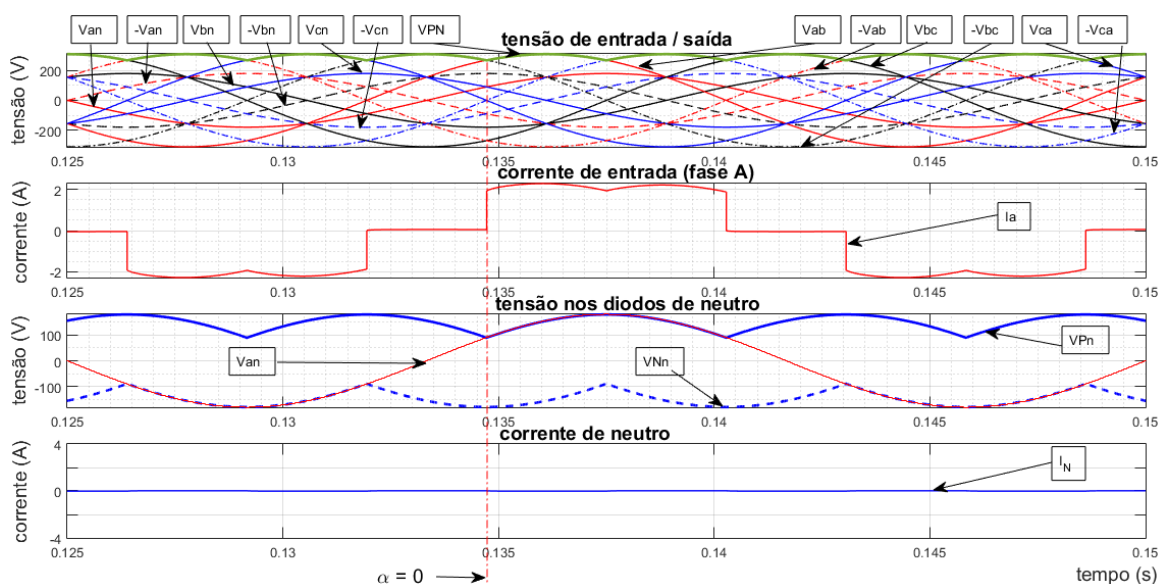


Figura 11: Ponte modificada semicontrolada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga puramente resistiva e $\alpha = 0^\circ$ (adaptado de [2])

2.3.2.2 Carga parte resistiva e parte indutiva para $\alpha = 0^\circ$

Para a ponte modificada semicontrolada da Figura 10, considerando uma carga elétrica, parte resistiva e parte indutiva, ou seja, $R > 0$ e $L > 0$: a forma de onda da corrente de entrada é quadrada com menores ondulações na parte superior, se assemelhando a uma reta, quanto maior for a indutância “L”, conforme mostrado na Figura 12. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 9, Anexo 10, Anexo 11, Anexo 12, Anexo 13, Anexo 14 e Anexo 15).

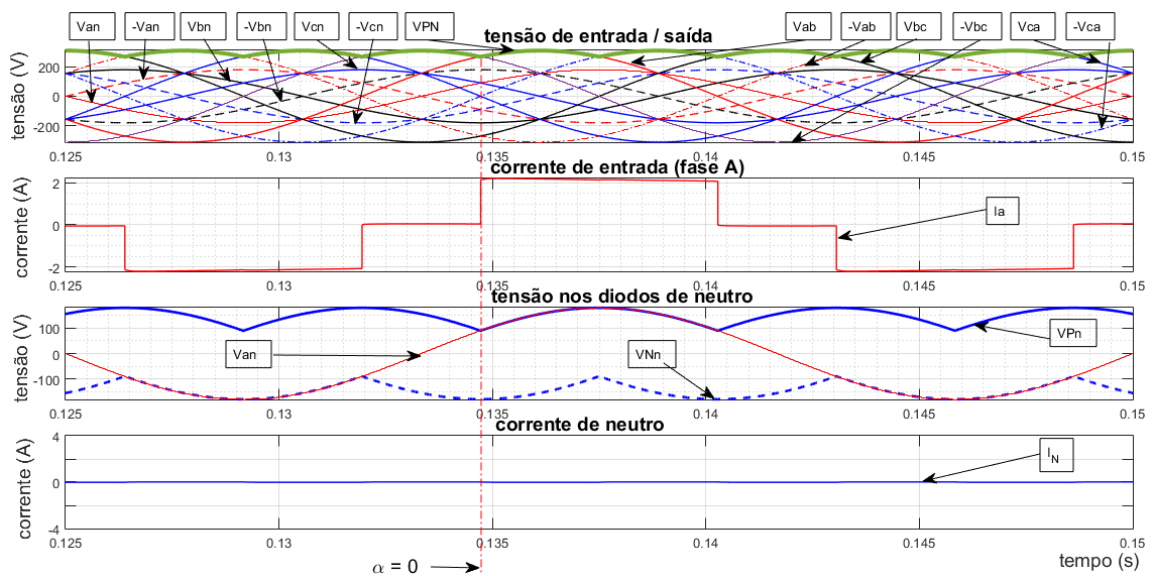


Figura 12: Ponte modificada semicontrolada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $\alpha = 0^\circ$ (adaptado de [2])

2.3.2.3 Carga parte resistiva e parte indutiva para $\alpha > 0^\circ$

Para a ponte modificada semicontrolada da Figura 10, considerando uma carga elétrica, parte resistiva e parte indutiva, ou seja, $R > 0$ e $L > 0$: a forma de onda da corrente de entrada é quadrada com menores ondulações e com a parte superior se assemelhando a uma reta, quanto maior for a indutância “L”, conforme mostrado na Figura 13, para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 9, Anexo 10, Anexo 11, Anexo 12, Anexo 13, Anexo 14 e Anexo 15).

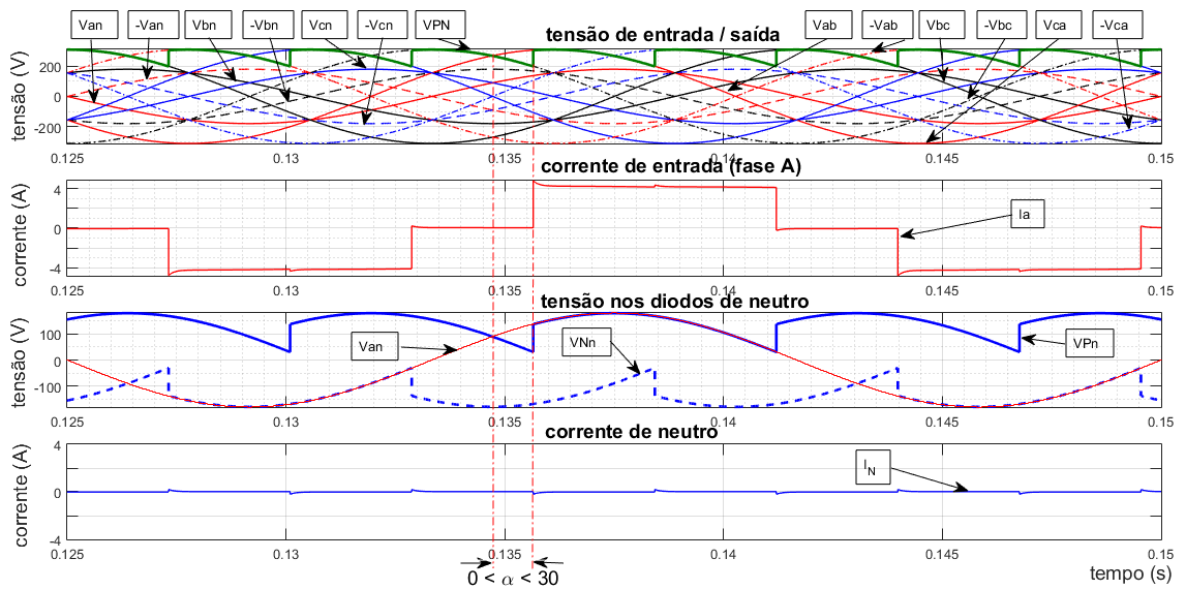


Figura 13: Ponte modificada semicontrolada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ (adaptado de [2])

Para a ponte modificada semicontrolada da Figura 10, considerando uma carga elétrica, parte resistiva e parte indutiva, ou seja, $R > 0$ e $L > 0$: a forma de onda da corrente de entrada é quadrada com menores ondulações e com a parte superior se assemelhando a uma reta, quanto maior for a indutância “L”, conforme mostrado na Figura 14, para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 9, Anexo 10, Anexo 11, Anexo 12, Anexo 13, Anexo 14 e Anexo 15).

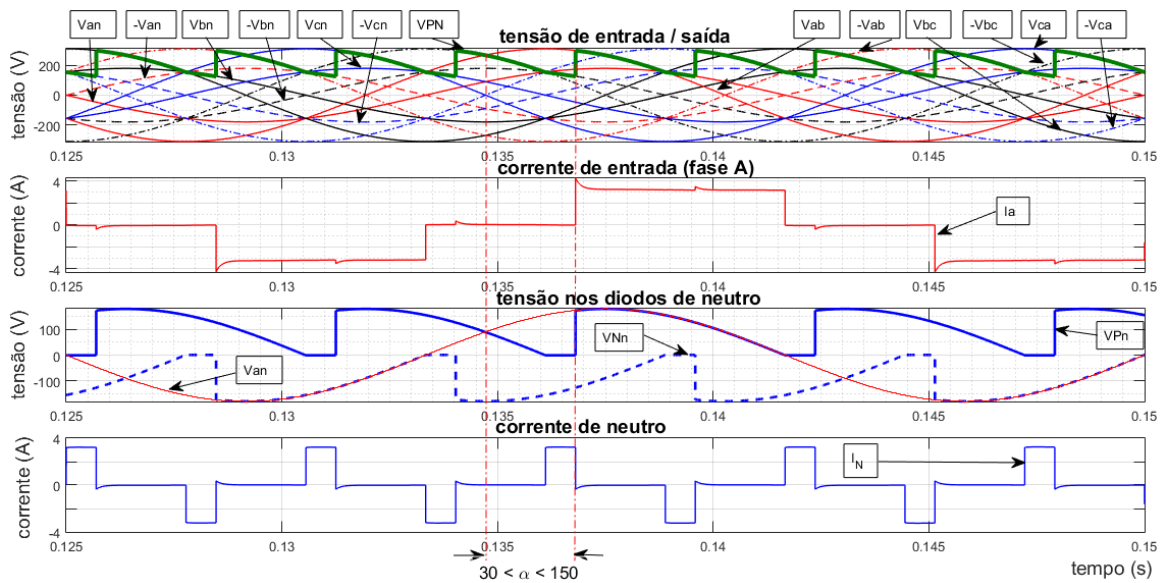


Figura 14: Ponte modificada semicontrolada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ (adaptado de [2])

2.3.3 Equações da ponte modificada semicontrolada

2.3.3.1 Geral

A corrente eficaz de entrada é dada pela equação:

$$I_{RMS} = \sqrt{(I_1)^2 + \sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2} \quad (19)$$

A relação entre os valores eficazes da corrente fundamental e de corrente de entrada é denominada fator de forma, dado pela equação:

$$F_f = \frac{I_1}{I_{RMS}} \quad (20)$$

A relação entre o valor eficaz das correntes harmônicas e o valor eficaz da corrente fundamental é denominada de taxa de distorção harmônica e dada pela equação:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2}}{I_1} \quad (21)$$

2.3.3.2 Equações para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$

Para a ponte modificada semicontrolada e ângulo de disparo $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$, valem as mesmas equações aplicadas à ponte convencional, ou seja, as equações (7) a (18) apresentadas no item 2.2.3.

2.3.3.3 Equações do fator de potência para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$

A ponte modificada semicontrolada é provida de seis tiristores de fase e dois diodos de neutro. Desta forma, a operação dos diodos de neutro equivale ao caso particular dos tiristores de neutro operando com ângulo de disparo igual 0° . Assim sendo, a ponte modificada semicontrolada operando com os tiristores de fase disparados no intervalo $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ acrescida dos diodos de neutro, equivale à ponte modificada controlada operando com os tiristores de fase disparados no intervalo $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ acrescida dos tiristores de neutro disparados com $\delta = 0^\circ$.

O fator de potência da ponte modificada semicontrolada é dado pelas equações:

- a) Para sistema elétrico com tensão senoidal e corrente não senoidal.

$$FP = \cos(\varphi) = \frac{I_1}{I_{RMS}} \times \cos(\varphi_1) \quad (22)$$

- b) Em função da distorção harmônica.

$$FP = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1+(DHT)^2}} \quad (23)$$

- c) Em função do ângulo de disparo principal e auxiliar:

- d) O fator de potência da ponte modificada semicontrolada da equação (24) é um caso particular da equação (35) da ponte modificada ($\delta = 0^\circ$), apresentada no item 2.4.3. O fator de potência é dado pela equação:

$$FP = \frac{\sqrt{2} \cdot [\cos(\alpha + \frac{\pi}{6}) + 1]}{\pi \cdot (\frac{5}{6} - \frac{\alpha}{\pi})^{0,5}} \quad (24)$$

Nota: Equação (24) com α e δ em radianos.

- e) Em função da potência de saída e da potência de entrada:

$$FP = \frac{V_o \cdot I_o}{\sqrt{3} \cdot V_{RMS} \cdot I_{RMS}} \quad (25)$$

2.3.3.4 Equação do fator de deslocamento para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$

A ponte modificada semicontrolada, operando com ângulo de disparo principal no intervalo $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$, equivale à ponte modificada controlada operando para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e ângulo de disparo auxiliar ajustado para $\delta = 0^\circ$.

O cosseno do ângulo entre a tensão de entrada e a corrente fundamental é denominado fator de deslocamento, e dado pelas equações:

a) Equação geral.

$$FD = \cos(\varphi_1) \quad (26)$$

b) O fator de deslocamento da ponte modificada semicontrolada da equação (27) é um caso particular da equação (38) da ponte modificada controlada ($\delta = 0^\circ$), apresentada no item 2.4.3. O fator de deslocamento é dado pela equação:

$$FD = \cos\left[\frac{\alpha + 30^\circ}{2}\right] \quad (27)$$

c) Em função da tensão média de saída e da tensão eficaz fase-fase.

$$FD = \sqrt{\frac{\pi \cdot V_o}{2\sqrt{6} \cdot V_{RMS}}} \quad (28)$$

2.3.3.5 Equação da tensão média de saída em CC para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$

A ponte modificada semicontrolada, operando com ângulo de disparo principal no intervalo $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$, equivale à ponte modificada controlada operando para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e ângulo de disparo auxiliar ajustado para $\delta = 0^\circ$. A tensão média de saída da ponte modificada semicontrolada da equação (29) é um caso particular da equação (40) da ponte modificada controlada ($\delta = 0^\circ$), apresentada no item 2.4.3. A tensão média de saída é dada pela equação:

$$V_o = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_{RMS} \cdot [\cos(\alpha + 30^\circ) + 1] \quad (29)$$

2.4 Ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz controlada

2.4.1 Geral

A ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz controlada, operando como ponte retificadora, conforme mostrado na Figura 15, é um equipamento alimentado por um sistema elétrico trifásico a 4 fios, composto por dois circuitos de disparo (disparo principal + disparo auxiliar), seis tiristores de fase (T1, T2, T3, T4, T5, T6), sendo três tiristores de fase superiores (T1, T3, T5) e três tiristores de fase inferiores (T4, T6, T2), acrescidos de dois tiristores de neutro (T7, T8), sendo um tiristor de neutro superior (T7) e um tiristor de neutro inferior (T8).

A ponte conversora trifásica modificada configuração Graetz controlada de seis pulsos, operando como ponte retificadora, mostrada na Figura 15, será chamada simplificada de ponte modificada controlada.

O circuito de disparo dos tiristores de fase opera, de forma que:

- a) Em operação normal, simultaneamente funcionam dois tiristores de fase, sendo um tiristor de fase superior e um tiristor de fase inferior (T1 + T2 ou T2 + T3 ou T3 + T4 ou T4 + T5 ou T5 + T6 ou T6 + T1).
- b) Em operação de comutação, simultaneamente funcionam três tiristores de fase (T1 + T2 + T3 ou T2 + T3 + T4 ou T3 + T4 + T5 ou T4 + T5 + T6 ou T5 + T6 + T1 ou T6 + T1 + T2).

O circuito de disparo dos tiristores de neutro opera, de forma que:

- a) O tiristor de neutro superior (T7) entra em operação quando os tiristores de fase superiores (T1, T3, T5) estão inoperantes.
- b) O tiristor de neutro inferior (T8) entra em operação quando os tiristores de fase inferiores (T4, T6, T2) estão inoperantes.
- c) Os tiristores de neutro entram em operação no período de $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$.

Os tiristores de fase e os tiristores de neutro são acionados pelos seus respectivos circuitos de disparo. Para cada tiristor, de fase ou de neutro, é aplicado um sinal de disparo nos terminais gate-catodo (ex.: para o tiristor de fase T1 é aplicado um sinal de disparo nos terminais G1-K1). Os tiristores de fase e de neutro funcionam, desde que simultaneamente:

- a) A tensão entre os terminais anodo-catodo do tiristor, seja positiva.
- b) Seja aplicado um sinal de disparo nos terminais gate-catodo do tiristor, controlado pelo circuito de disparo do tiristor.
- c) O ângulo de disparo “ α ” indica o momento em que é iniciada a condução da corrente no conversor, considerando que o tiristor de fase está diretamente polarizado; a condução de corrente no tiristor de fase é interrompida quando o ângulo de disparo está interrompido e o tiristor de fase não está mais polarizado diretamente.
- d) O ângulo de disparo “ δ ” indica o momento em que é iniciada a condução da corrente no conversor, considerando que o tiristor de neutro está

diretamente polarizado; a condução de corrente no tiristor de neutro é interrompida quando o ângulo de disparo está interrompido e o tiristor de neutro não está mais polarizado diretamente.

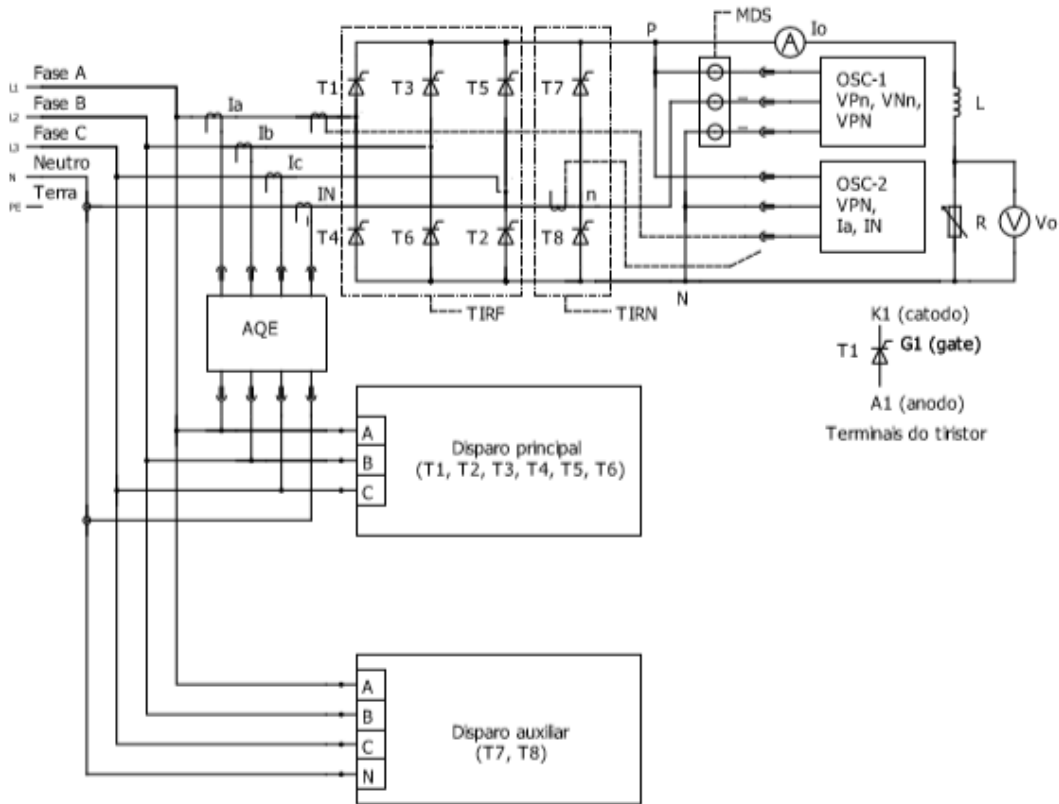


Figura 15: Ponte modificada controlada (adaptado de [2], [21], [32])

2.4.2 Formas de onda de entrada e de saída na ponte modificada controlada

2.4.2.1 Carga puramente resistiva para $\alpha = 0^\circ$ e $\delta = 0^\circ$

Para a ponte modificada controlada da Figura 15, considerando uma carga elétrica puramente resistiva, ou seja, $R > 0$ e $L = 0$, a forma de onda da corrente de entrada é quadrada com ondulações na parte superior, conforme mostrado na Figura 16, para ângulo de disparo principal $\alpha = 0^\circ$ e ângulo de disparo auxiliar $\delta = 0^\circ$. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7 e Anexo 8).

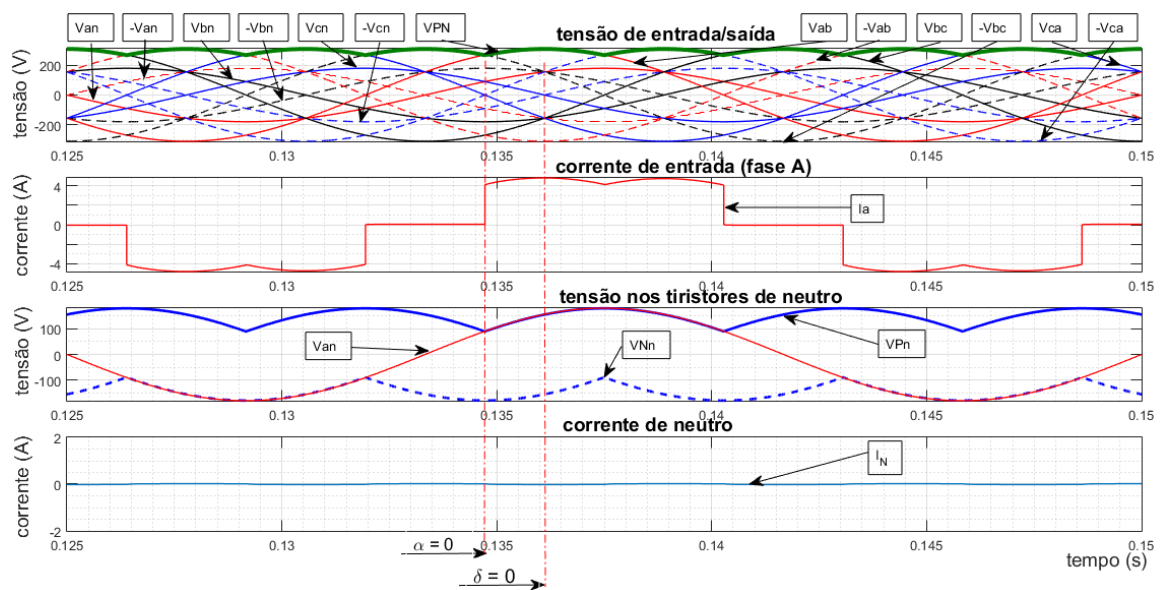


Figura 16: Ponte modificada controlada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga puramente resistiva e $\alpha = 0^0$ e $\delta = 0^0$ (adaptado de [2], [21])

2.4.2.2 Carga parte resistiva e parte indutiva para $\alpha = 0^0$ e $\delta = 0^0$

Para a ponte modificada controlada da Figura 15, considerando uma carga elétrica, parte resistiva e parte indutiva, ou seja, $R > 0$ e $L > 0$, a forma de onda da corrente de entrada é quadrada com menores ondulações na parte superior, se assemelhando a uma reta, quanto maior for a indutância “L”, conforme mostrado na Figura 17, para ângulos de disparo $\alpha = 0^0$ e $\delta = 0^0$. A corrente de neutro para $\alpha = 0^0$ e $\delta = 0^0$ é zero. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7 e Anexo 8).

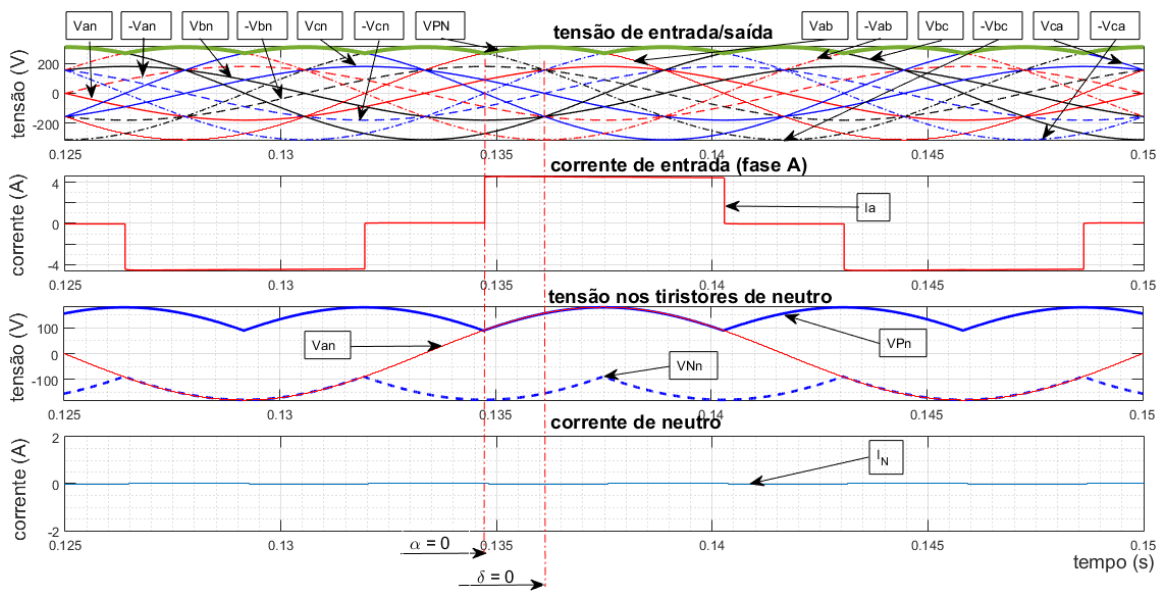


Figura 17: Ponte modificada controlada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $\alpha = 0^\circ$ e $\delta = 0^\circ$ (adaptado de [2], [21])

2.4.2.3 Carga parte resistiva e parte indutiva para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$

Para a ponte modificada controlada da Figura 15, considerando uma carga elétrica, parte resistiva e parte indutiva, ou seja, $R > 0$ e $L > 0$: a forma de onda da corrente de entrada é quadrada com menores ondulações e com a parte superior se assemelhando a uma reta, quanto maior for a indutância “L”, conforme mostrado na Figura 18, para $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ e $\delta > 0^\circ$; a corrente de neutro (I_N) para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$; $\delta \geq 0^\circ$ é zero. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7 e Anexo 8).

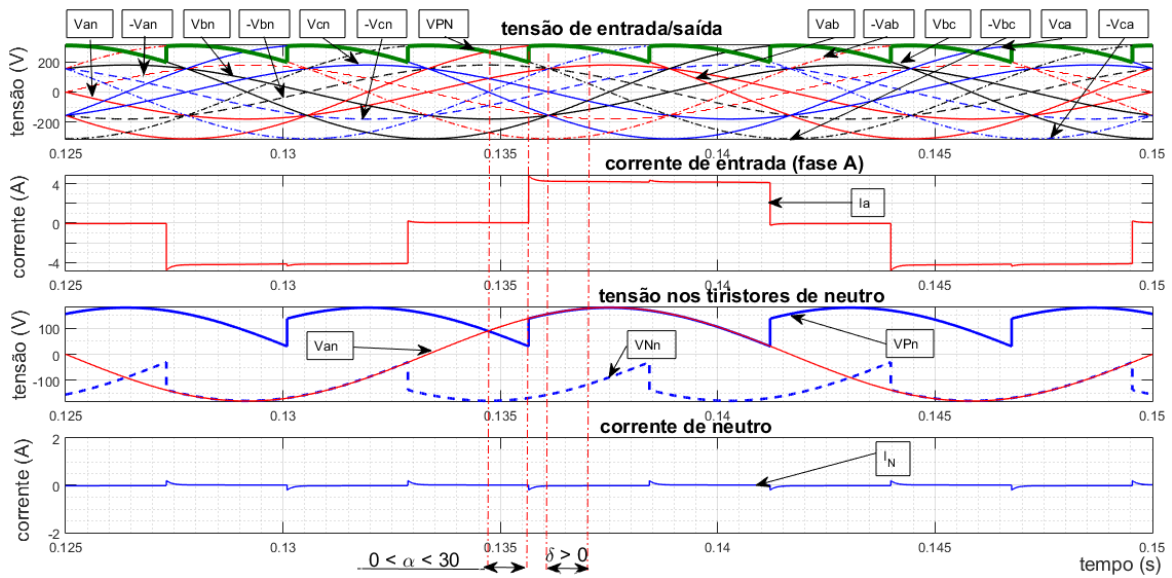


Figura 18: Ponte modificada controlada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ (adaptado de [2], [21])

As correntes de fase (I_a , I_b , I_c) e a corrente de neutro (I_N) da ponte modificada controlada para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ são apresentadas na Figura 19. Salienta-se que:

- A corrente da fase A é composta pelo somatório algébrico das correntes dos tiristores T1 e T4, ou seja, $I_a = I_{T1} - I_{T4}$; a corrente que passa pelo tiristor T1 corresponde ao semi-ciclo positivo da corrente da fase A; a corrente que passa pelo tiristor T4 corresponde ao semi-ciclo negativo da corrente da fase A.
- A corrente da fase B é composta pelo somatório algébrico das correntes dos tiristores T3 e T6, ou seja, $I_b = I_{T3} - I_{T6}$; a corrente que passa pelo tiristor T3 corresponde ao semi-ciclo positivo da corrente da fase B; a corrente que passa pelo tiristor T6 corresponde ao semi-ciclo negativo da corrente da fase B.
- A corrente da fase C é composta pelo somatório algébrico das correntes dos tiristores T5 e T2, ou seja, $I_c = I_{T5} - I_{T2}$; a corrente que passa pelo tiristor T5 corresponde ao semi-ciclo positivo da corrente da fase C; a corrente que passa pelo tiristor T2 corresponde ao semi-ciclo negativo da corrente da fase C.
- A corrente de neutro é composta pelo somatório algébrico das correntes dos tiristores T7 e T8, ou seja, $I_N = I_{T7} - I_{T8}$; a corrente que passa pelo tiristor T7 corresponde ao semi-ciclo positivo da corrente de neutro e assume valor nulo, pois o tiristor T7 está inoperante; a corrente que passa pelo tiristor T8

corresponde ao semi-ciclo negativo da corrente de neutro e assume valor zero, pois o tiristor T8 está inoperante; a corrente de neutro assume valor nulo, uma vez que o tiristor de neutro T7 e o tiristor de neutro T8 estão inoperantes. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7 e Anexo 8).

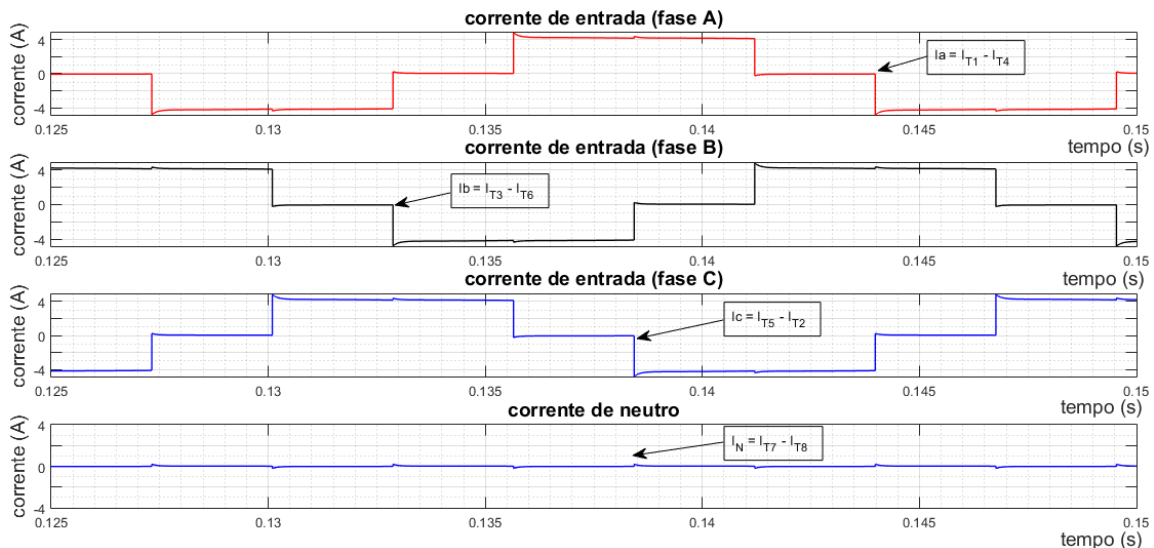


Figura 19: Ponte modificada controlada – corrente de entrada de fase e de neutro para carga RL e $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$ (adaptado de [2], [21])

2.4.2.4 Carga parte resistiva e parte indutiva para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$

Para a ponte modificada controlada da Figura 15, considerando uma carga elétrica, parte resistiva e parte indutiva, ou seja, $R > 0$ e $L > 0$, a forma de onda da corrente de entrada é quadrada com menores ondulações e com a parte superior se assemelhando a uma reta, quanto maior for a indutância “L”, conforme mostrado na Figura 20, para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$; a corrente de neutro (I_N) é diferente de zero para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$. As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7 e Anexo 8).

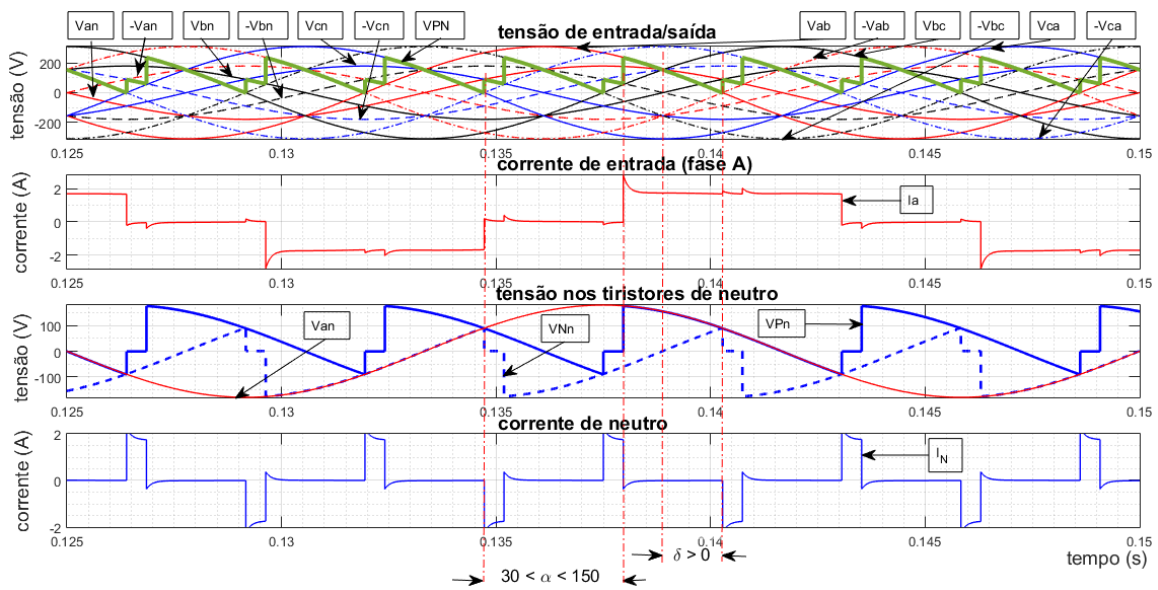


Figura 20: Ponte modificada controlada – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$ (adaptado de [2], [21])

As correntes de fase (I_a , I_b , I_c) e a corrente de neutro (I_N) da ponte modificada controlada para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$ são apresentadas na Figura 21. Salienta-se que:

- A corrente da fase A é composta pelo somatório algébrico das correntes dos tiristores T1 e T4, ou seja, $I_a = I_{T1} - I_{T4}$; a corrente que passa pelo tiristor T1 corresponde ao semi-ciclo positivo da corrente da fase A; a corrente que passa pelo tiristor T4 corresponde ao semi-ciclo negativo da corrente da fase A.
- A corrente da fase B é composta pelo somatório algébrico das correntes dos tiristores T3 e T6, ou seja, $I_b = I_{T3} - I_{T6}$; a corrente que passa pelo tiristor T3 corresponde ao semi-ciclo positivo da corrente da fase B; a corrente que passa pelo tiristor T6 corresponde ao semi-ciclo negativo da corrente da fase B.
- A corrente da fase C é composta pelo somatório algébrico das correntes dos tiristores T5 e T2, ou seja, $I_c = I_{T5} - I_{T2}$; a corrente que passa pelo tiristor T5 corresponde ao semi-ciclo positivo da corrente da fase C; a corrente que passa pelo tiristor T2 corresponde ao semi-ciclo negativo da corrente da fase C.
- A corrente de neutro é composta pelo somatório algébrico das correntes dos tiristores T7 e T8, ou seja, $I_N = I_{T7} - I_{T8}$; a corrente que passa pelo tiristor T7 corresponde ao semi-ciclo positivo da corrente de neutro; a corrente que passa pelo tiristor T8 corresponde ao semi-ciclo negativo da corrente de neutro. As

formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7 e Anexo 8).

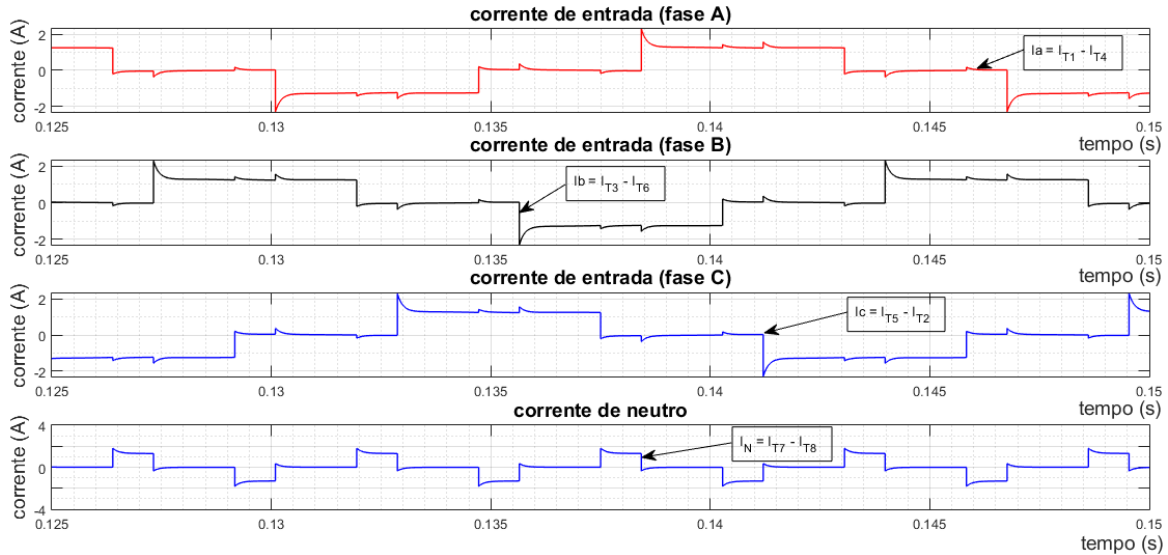


Figura 21: Ponte modificada controlada – corrente de entrada de fase e de neutro para carga RL e $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ (adaptado de [2], [21])

2.4.3 Equações da ponte modificada controlada

2.4.3.1 Geral

A corrente eficaz de entrada é dada pela equação:

$$I_{RMS} = \sqrt{(I_1)^2 + \sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2} \quad (30)$$

A relação entre os valores eficazes da corrente fundamental e de corrente de entrada é denominada fator de forma, dado pela equação:

$$F_f = \frac{I_1}{I_{RMS}} \quad (31)$$

A relação entre o valor eficaz das correntes harmônicas e o valor eficaz da corrente fundamental é denominada de taxa de distorção harmônica e dada pela equação:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2}}{I_1} \quad (32)$$

2.4.3.2 Equações para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$

Para a ponte modificada controlada e ângulo de disparo $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$, valem as mesmas equações aplicadas à ponte convencional, ou seja, as equações (7) a (18) apresentadas no item 2.2.3.

2.4.3.3 Equações do fator de potência para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$

O fator de potência da ponte modificada controlada é dado pelas equações:

a) Para sistema elétrico com tensão senoidal e corrente não senoidal.

$$FP = \cos(\varphi) = \frac{I_1}{I_{RMS}} \times \cos(\varphi_1) \quad (33)$$

b) Em função da distorção harmônica.

$$FP = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1+(DHT)^2}} \quad (34)$$

c) Em função do ângulo de disparo principal e o ângulo de disparo auxiliar:

$$FP = \frac{\sqrt{2} \cdot [\cos(\alpha + \frac{\pi}{6}) + \cos(\delta)]}{\pi \cdot (\frac{5}{6} + \frac{\delta - \alpha}{\pi})^{0,5}} \quad (35)$$

Nota: Equação (35) com α e δ em radianos

d) Em função da potência de saída e da potência de entrada:

$$FP = \frac{V_o \cdot I_o}{\sqrt{3} \cdot V_{RMS} \cdot I_{RMS}} \quad (36)$$

2.4.3.4 Equação do fator de deslocamento para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$

O cosseno do ângulo entre a tensão de entrada e a corrente fundamental é denominado fator de deslocamento, e dado pelas equações:

a) Equação geral.

$$FD = \cos(\varphi_1) \quad (37)$$

b) Em função do ângulo de disparo principal e do ângulo de disparo auxiliar.

$$FD = \cos\left[\frac{\alpha + \delta + 30^{\circ}}{2}\right] \quad (38)$$

c) Em função da tensão média de saída e da tensão eficaz fase-fase.

$$FD = \sqrt{\frac{\pi \cdot V_o}{2\sqrt{6} \cdot V_{RMS}}} \quad (39)$$

2.4.3.5 Equação da tensão média de saída em CC para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$

A tensão média de saída é dada pela equação:

$$V_o = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_{RMS} \cdot [\cos(\alpha + 30^{\circ}) + \cos(\delta)] \quad (40)$$

2.5 Tensão de saída da ponte modificada controlada x tiristores operantes

2.5.1 Geral

A ponte modificada controlada da Figura 15, funcionando com o ângulo de disparo principal ajustado no intervalo $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e ângulo de disparo auxiliar ajustado para $\delta \geq 0^{\circ}$, os tiristores de fase (T1, T2, T3, T4, T5, T6) operam e os tiristores de neutro (T7, T8) permanecem inoperantes. Segundo V.R. Stefanovic 1979 [2], os tiristores de fase operam, pois são polarizados diretamente e recebem sinais de disparo do circuito de controle de disparo principal (CCDP). Os tiristores de neutro não operam, pois não são polarizados diretamente, embora recebam sinais de disparo do circuito de controle de disparo auxiliar (CCDA).

A ponte modificada controlada da Figura 15, funcionando com o ângulo de disparo principal ajustado no intervalo $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e ângulo de disparo auxiliar ajustado para $\delta \geq 0^{\circ}$, os tiristores de fase (T1, T2, T3, T4, T5, T6) e os tiristores de neutro (T7, T8) operam. Segundo V.R. Stefanovic 1979 [2], os tiristores de fase e de neutro operam pois são polarizados diretamente e recebem sinais de disparo de seus circuitos de controle de disparo principal (CCDP) e auxiliar (CCDA), respectivamente.

2.5.2 Tensão de saída x tiristores operantes para $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$

Para se ter uma melhor compreensão do funcionamento da bancada de teste operando como ponte modificada controlada para $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$, é apresentada na Figura 22 o gráfico com as formas de onda de tensão de entrada, tensão de saída e corrente de entrada de neutro, inerentes à corrente de entrada da fase A (I_a) da bancada de teste. Para as demais correntes de fase (I_b e I_c), o gráfico é similar ocorrendo uma defasagem de 120° da corrente da fase B com relação a corrente da fase A ou uma defasagem de 240° da corrente da fase C com relação a corrente da fase A.

Na Figura 22, observa-se que a corrente na fase A assume valores diferentes de zero ($I_a \neq 0$) em determinados intervalos de funcionamento da ponte modificada controlada e nestes intervalos foram identificadas as parcelas de tensão de entrada que compõem a tensão de saída em CC, sendo que: no intervalo correspondente ao semi-ciclo positivo da corrente de entrada da fase A ($I_a > 0$), a tensão de saída em CC é composta pela parcela de tensão fase-fase de entrada V_{ab} (intervalo r_1) e pela parcela de tensão fase-fase de entrada V_{ac} (intervalo r_3); no intervalo correspondente ao semi-ciclo negativo da corrente de entrada da fase A ($I_a < 0$), a tensão de saída em CC é composta pela parcela de tensão fase-fase de entrada $-V_{ab}$ (intervalo r_4) e pela parcela de tensão fase-fase de entrada $-V_{ac}$ (intervalo r_6); durante todo o ciclo de operação da corrente de entrada da fase A, a corrente de neutro é nula ($I_N = 0$). As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7 e Anexo 8).

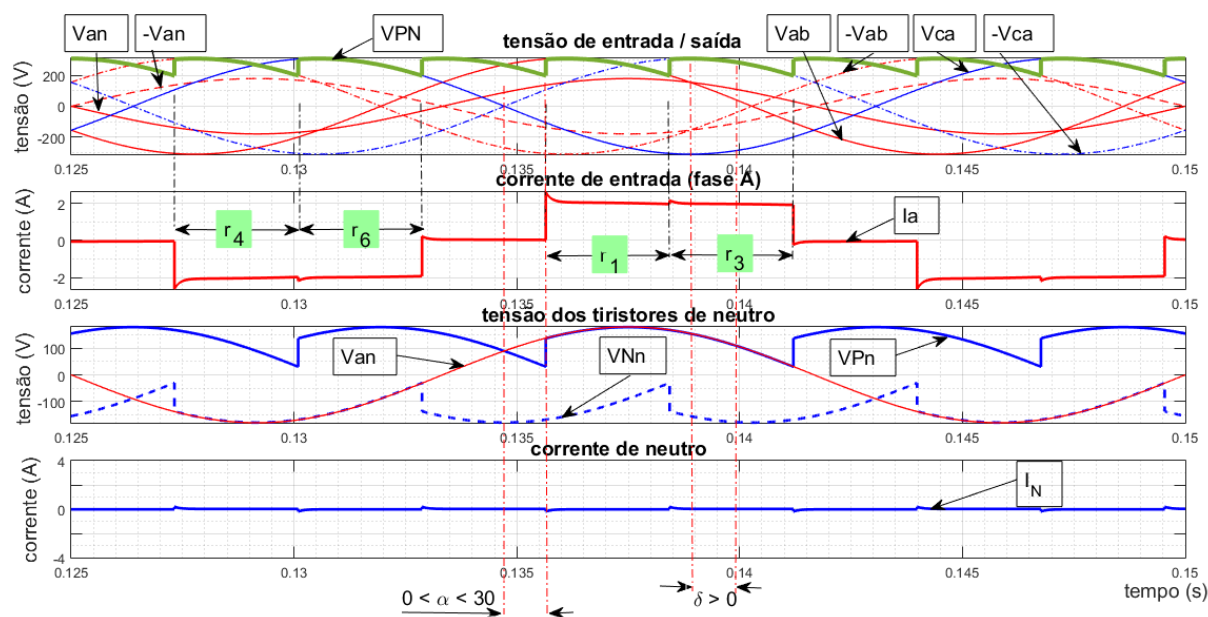


Figura 22: Ponte modificada controlada (fase A) – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$ (adaptado de [2], [21])

2.5.3 Tensão de saída x tiristores operantes para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$

Para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada no intervalo $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$, é apresentada na Figura 23 o gráfico com as formas de onda de tensão de entrada, tensão de saída e corrente de entrada de neutro, inerentes à corrente de entrada da fase A (I_a) da bancada de teste. Para as demais

correntes de fase (I_b e I_c), o gráfico é similar ocorrendo uma defasagem de 120° da corrente da fase B com relação a corrente da fase A ou uma defasagem de 240° da corrente da fase C com relação a corrente da fase A.

Na Figura 23, observa-se que a corrente na fase A assume valores diferentes de zero ($I_a \neq 0$) em determinados intervalos de funcionamento da ponte modificada controlada e nestes intervalos foram identificadas as parcelas de tensão de saída em CC, sendo que: no intervalo correspondente ao semi-ciclo positivo da corrente de entrada da fase A ($I_a > 0$), a tensão de saída em CC é composta pela parcela de tensão fase-fase de entrada V_{ab} (intervalo r_1), pela parcela de tensão fase-fase de entrada V_{ac} (intervalo r_3) e pela parcela de tensão fase-neutro de entrada V_{an} (intervalo r_2); no intervalo correspondente ao semi-ciclo negativo da corrente de entrada da fase A ($I_a < 0$), a tensão de saída é composta pela parcela de tensão fase-fase de entrada $-V_{ab}$ (intervalo r_4), pela parcela de tensão fase-fase de entrada $-V_{ac}$ (intervalo r_6) e pela parcela de tensão fase-neutro de entrada $-V_{an}$ (intervalo r_5). A corrente de neutro é diferente de zero ($I_N < 0$) no semi-ciclo positivo da corrente de entrada da fase A em que a tensão de saída em CC é composta pela parcela de tensão fase-neutro de entrada V_{an} (intervalo r_2); a corrente de neutro é diferente de zero ($I_N > 0$) no semi-ciclo negativo da corrente de entrada da fase A em que a tensão de saída em CC é composta pela parcela de tensão fase-neutro de entrada $-V_{an}$ (intervalo r_5). As formas de onda foram obtidas com o auxílio do Matlab / Simulink (Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7 e Anexo 8).

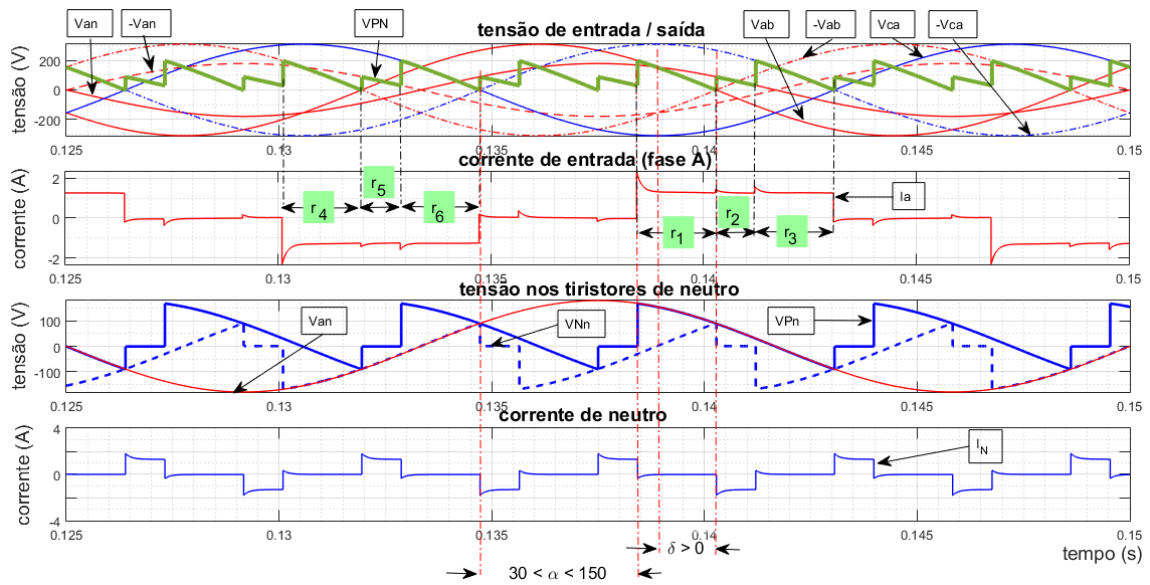


Figura 23: Ponte modificada controlada (fase A) – tensão de entrada/saída e corrente de entrada para carga RL e $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$ (adaptado de [2], [21])

2.5.4 Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_1 ($VPN = Vab$)

Na Figura 22 para $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$ e na Figura 23 para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$ é mostrada a tensão de saída em CC ($VPN = VPn - VNn$) do intervalo r_1 , correspondente a corrente de entrada da fase A da ponte modificada controlada. No intervalo r_1 a tensão de saída em CC é $VPN = Vab$, os tiristores T1 e T6 estão operantes e os demais tiristores estão inoperantes. O tiristor T1 acopla a tensão de entrada da fase A ao terminal “P” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo positivo da bancada de teste; da mesma forma, o tiristor T6 acopla a tensão de entrada da fase B ao terminal “N” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo negativo da bancada de teste.

Na Figura 24 são mostrados, para o intervalo r_1 , os tiristores operantes (T1 e T6), os tiristores não operantes (apresentados em tracejado), o caminho percorrido pela corrente da fase A (I_a) e a tensão de saída em CC ($VPN = V_{ab}$) para a ponte modificada controlada operando para $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$ e para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$.

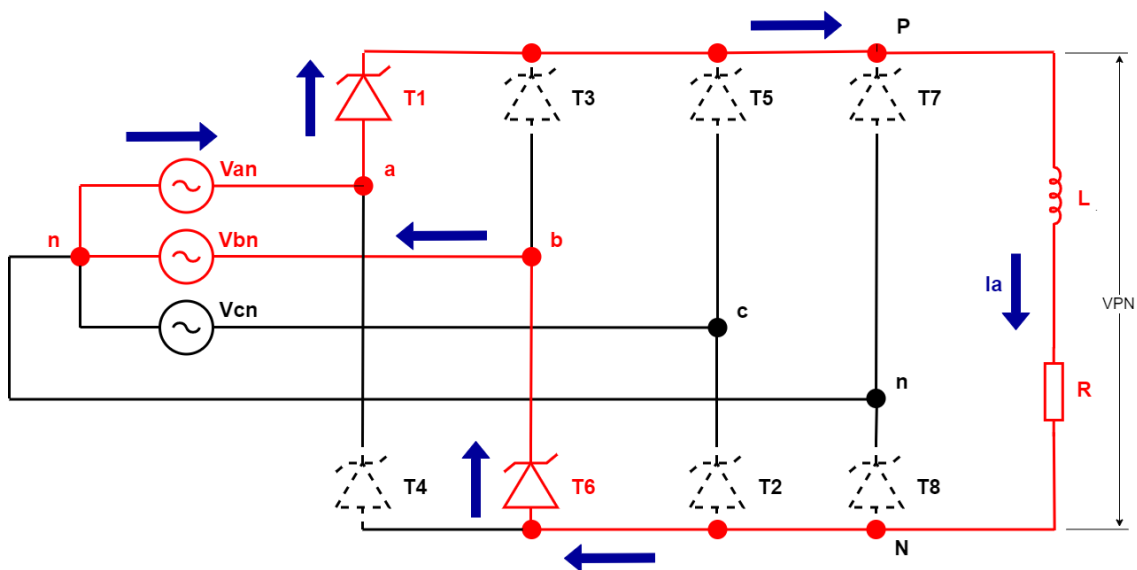


Figura 24: Ponte modificada controlada – tiristores T1 e T6 operantes (adaptado de [2], [32])

2.5.5 Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_2 ($V_{PN}=V_{an}$)

Na Figura 23 é mostrada a tensão de saída em CC ($V_{PN} = V_{Pn} - V_{Nn}$) do intervalo r_2 , correspondente a corrente de entrada da fase A da ponte modificada controlada, para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$. No intervalo r_2 a tensão de saída em CC é $V_{PN} = V_{an}$, os tiristores T1 e T8 estão operantes e os demais tiristores estão inoperantes. O tiristor T1 acopla a tensão de entrada da fase A ao terminal “P” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo positivo da bancada de teste; da mesma forma, o tiristor T8 acopla o neutro ao terminal “N” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo negativo da bancada de teste.

Na Figura 25 são mostrados, para o intervalo r_2 , os tiristores operantes (T1 e T8), os tiristores não operantes (apresentados em tracejado), o caminho percorrido pela corrente da fase A (I_a) e a tensão de saída em CC ($V_{PN} = V_{an}$) para a ponte modificada controlada operando para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$.

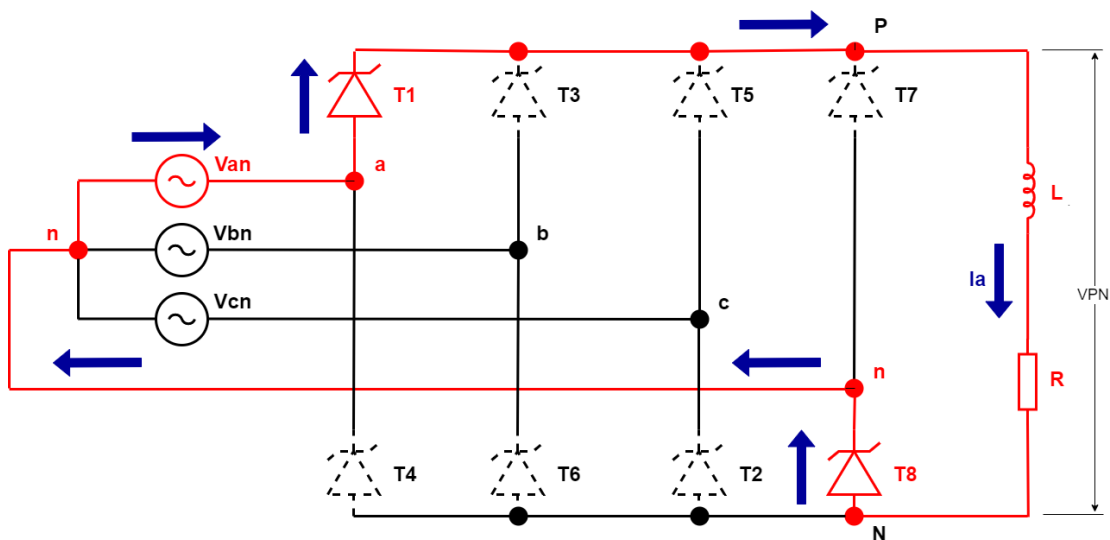


Figura 25: Ponte modificada controlada – tiristores T1 e T8 operantes (adaptado de [2], [32])

2.5.6 Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_3 ($VPN=V_{ac}$)

Na Figura 22 para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ e na Figura 23 para $30^\circ < \alpha < 150^\circ$ e $\delta > 0^\circ$ é mostrada a tensão de saída em CC ($VPN = VPn - VNn$) do intervalo r_3 , correspondente a corrente de entrada da fase A da ponte modificada controlada. No intervalo r_3 a tensão de saída em CC é $VPN = V_{ac}$, os tiristores T1 e T2 estão operantes e os demais tiristores estão inoperantes. O tiristor T1 acopla a tensão de entrada da fase A ao terminal “P” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo positivo da bancada de teste; da mesma forma, o tiristor T2 acopla a tensão de entrada da fase C ao terminal “N” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo negativo da bancada de teste.

Na Figura 26 são mostrados, para o intervalo r_3 , os tiristores operantes (T1 e T2), os tiristores não operantes (apresentados em tracejado), o caminho percorrido pela corrente da fase A (I_a) e a tensão de saída em CC ($VPN = V_{ac}$) para a ponte modificada controlada operando para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ e para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$.

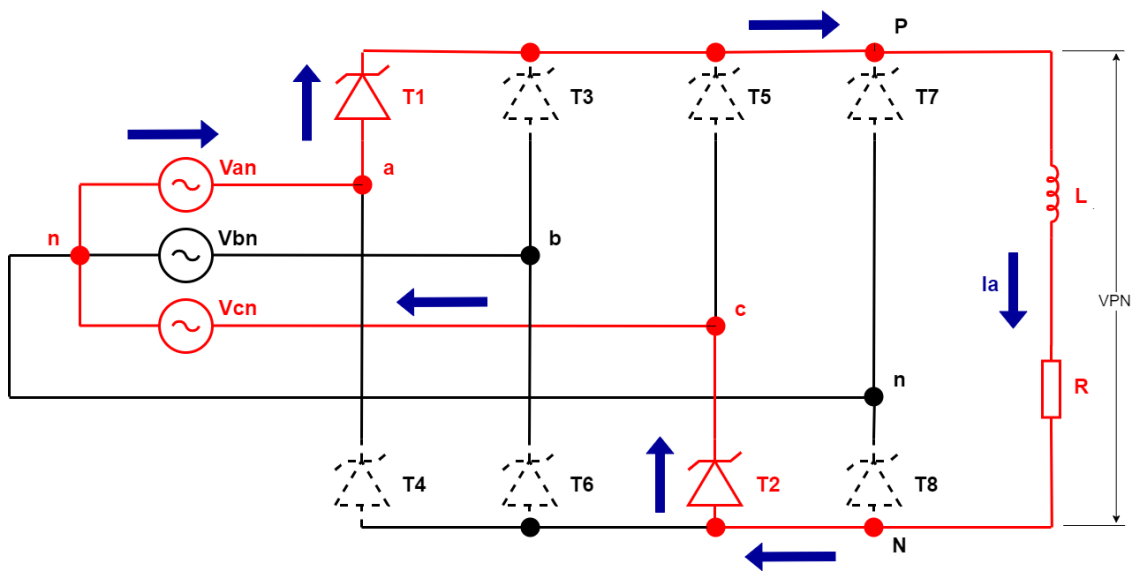


Figura 26: Ponte modificada controlada – tiristores T1 e T2 operantes (adaptado de [2], [32])

2.5.7 Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_4 ($VPN = -Vab$)

Na Figura 22 para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ e na Figura 23 para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ é mostrada a tensão de saída em CC ($VPN = VPn - VNn$) do intervalo r_4 , correspondente a corrente de entrada da fase A da ponte modificada controlada. No intervalo r_4 a tensão de saída em CC é $VPN = -Vab$, os tiristores T4 e T3 estão operantes e os demais tiristores estão inoperantes. O tiristor T4 acopla a tensão de entrada da fase A ao terminal “N” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo negativo da bancada de teste; da mesma forma, o tiristor T3 acopla a tensão de entrada da fase B ao terminal “P” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo positivo da bancada de teste.

Na Figura 27 são mostrados, para o intervalo r_4 , os tiristores operantes (T4 e T3), os tiristores não operantes (apresentados em tracejado), o caminho percorrido pela corrente da fase A (I_a) e a tensão de saída em CC ($VPN = -Vab$) para a ponte modificada controlada operando para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ e para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$.

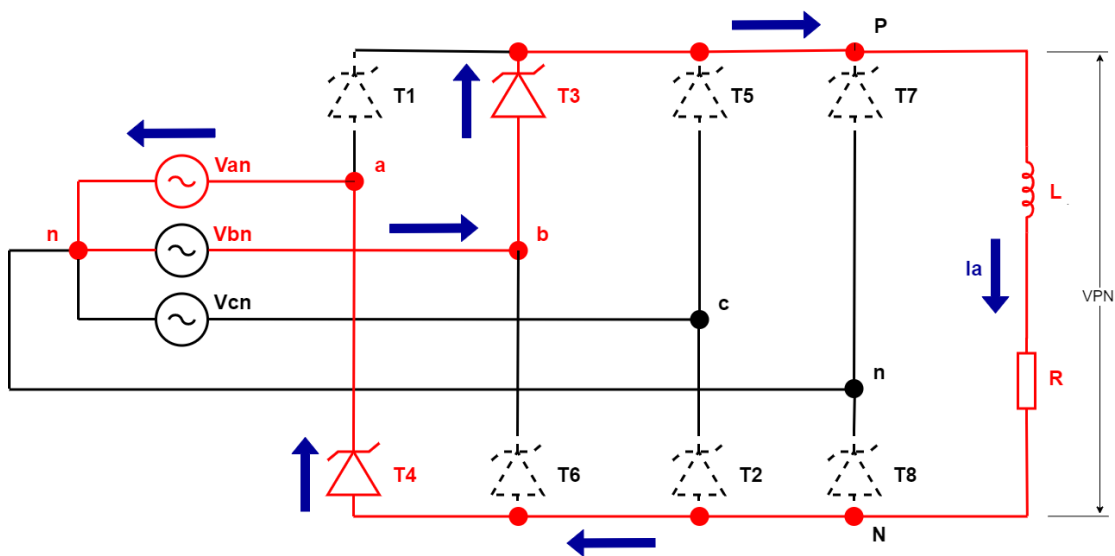


Figura 27: Ponte modificada controlada – tiristores T4 e T3 operantes (adaptado de [2], [32])

2.5.8 Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_5 ($VPN = -V_{an}$)

Na Figura 23 é mostrada a tensão de saída em CC ($VPN = VPn - VNn$) do intervalo r_5 , correspondente a corrente de entrada da fase A da ponte modificada controlada, para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$. No intervalo r_5 a tensão de saída em CC é $VPN = -V_{an}$, os tiristores T4 e T7 estão operantes e os demais tiristores estão inoperantes. O tiristor T4 acopla a tensão de entrada da fase A ao terminal “N” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo negativo da bancada de teste; da mesma forma, o tiristor T7 acopla o neutro ao terminal “P” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo positivo da bancada de teste.

Na Figura 28 são mostrados, para o intervalo r_5 , os tiristores operantes (T4 e T7), os tiristores não operantes (apresentados em tracejado), o caminho percorrido pela corrente da fase A (I_a) e a tensão de saída em CC ($VPN = -V_{an}$) para a ponte modificada controlada operando para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$.

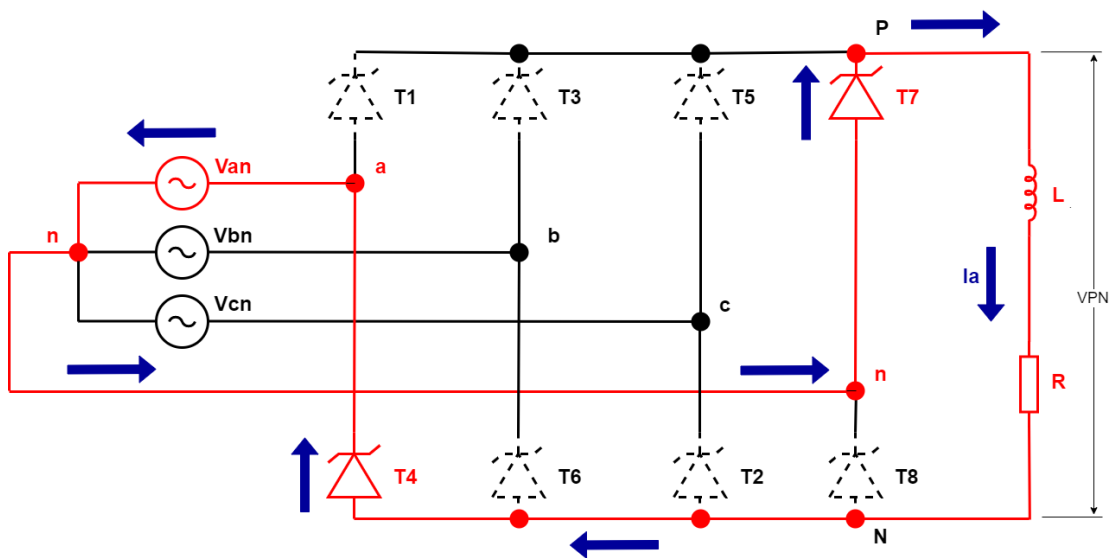


Figura 28: Ponte modificada controlada – tiristores T4 e T7 operantes (adaptado de [2], [32])

2.5.9 Tensão de saída para tiristores operantes no intervalo r_6 ($V_{PN} = -V_{ac}$)

Na Figura 22 para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ e na Figura 23 para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ é mostrada a tensão de saída em CC ($V_{PN} = V_{Pn} - V_{Nn}$) do intervalo r_6 , correspondente a corrente de entrada da fase A da ponte modificada controlada. No intervalo r_6 a tensão de saída em CC é $V_{PN} = -V_{ac}$, os tiristores T4 e T5 estão operantes e os demais tiristores estão inoperantes. O tiristor T4 acopla a tensão de entrada da fase A ao terminal “N” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo negativo da bancada de teste; da mesma forma, o tiristor T5 acopla a tensão de entrada da fase C ao terminal “P” de saída da bancada de teste, correspondente ao polo positivo da bancada de teste.

Na Figura 29 são mostrados, para o intervalo r_6 , os tiristores operantes (T4 e T5), os tiristores não operantes (apresentados em tracejado), o caminho percorrido pela corrente da fase A (I_a) e a tensão de saída em CC ($V_{PN} = -V_{ac}$) para a ponte modificada controlada operando para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ e para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$.

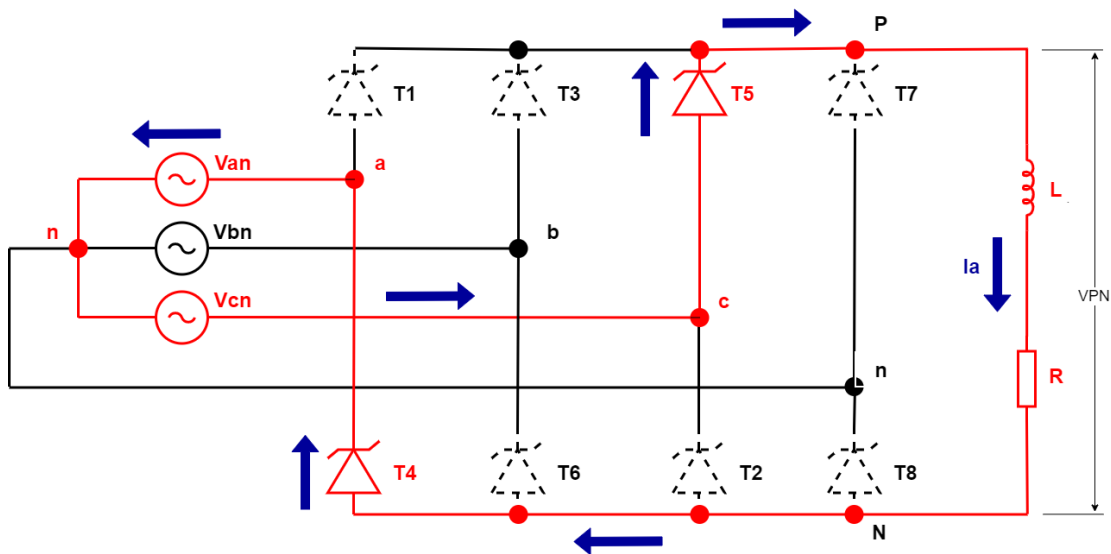


Figura 29: Ponte modificada controlada – tiristores T4 e T5 operantes (adaptado de [2], [32])

Na Tabela 1 são mostradas as parcelas de tensão que compõem a forma de onda da tensão de saída em CC, para os pares de tiristores operantes em cada semi-ciclo de corrente de entrada de fase (I_a , I_b , I_c) da ponte modificada controlada.

Tabela 1: Ponte modificada controlada – tensão de saída x tiristores operantes

Ponte modificada controlada – tensão de saída x tiristores operantes					
Corrente	Tensão saída semi-ciclo		Tiristor em operação	intervalo de operação	Referência
	Positivo	Negativo			
I_a	V_{ab}		T1-T6	r_1	Fig. 22, 23 e 24
	V_{an}		T1-T8	r_2	Fig. 23 e 25
	V_{ac}		T1-T2	r_3	Fig. 22, 23 e 26
		$-V_{ab}$	T4-T3	r_4	Fig. 22, 23 e 27
		$-V_{an}$	T4-T7	r_5	Fig. 23 e 28
		$-V_{ac}$	T4-T5	r_6	Fig. 22, 23 e 29
I_b	V_{bc}		T3-T2	r_1 - 120°	Fig. 22 e 23
	V_{bn}		T3-T8	r_2 - 120°	
	V_{ba}		T3-T4	r_3 - 120°	
		$-V_{bc}$	T6-T5	r_4 - 120°	
		$-V_{bn}$	T6-T7	r_5 - 120°	
		$-V_{ba}$	T6-T1	r_6 - 120°	
I_c	V_{ca}		T5-T4	r_1 + 120°	Fig. 22 e 23
	V_{cn}		T5-T8	r_2 + 120°	
	V_{cb}		T5-T6	r_3 + 120°	
		$-V_{ca}$	T2-T1	r_4 + 120°	
		$-V_{cn}$	T2-T7	r_5 + 120°	
		$-V_{cb}$	T2-T3	r_6 + 120°	

3 PROPOSTA DE PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DA PONTE MODIFICADA CONTROLADA

3.1 Geral

V.R. Stefanovic 1979 [2] propôs um arranjo teórico e de simulação digital do funcionamento da ponte modificada controlada, apresentada no diagrama da Figura 15. Com base nos estudos supracitados, este capítulo apresenta uma proposta de dois circuitos de disparo independentes, um circuito para disparar os tiristores de fase (circuito de controle de disparo principal ou disparo principal) e um segundo circuito para disparar os tiristores de neutro (circuito de controle de disparo auxiliar ou disparo auxiliar) para compor o arranjo da Figura 30 e operar em conformidade com o estudo teórico de V.R. Stefanovic 1979 [2].

O circuito de disparo principal deve acionar os tiristores de fase. Na Figura 30, os tiristores de fase são identificados como TIRF e são compostos pelos tiristores T1, T2, T3, T4, T5 e T6; já o circuito de disparo principal é identificado como CCDP e cada tiristor de fase é acionado, ao aplicar ao tiristor um pulso entre o gate e o catodo e estando o tiristor diretamente polarizado; o tiristor de fase deixa de conduzir quando é cortado o sinal de disparo gate-catodo e não está polarizado diretamente.

O circuito de disparo auxiliar deve acionar os tiristores de neutro. Na Figura 30, os tiristores de neutro são identificados como TIRN e são compostos pelos tiristores T7 e T8; o circuito de disparo auxiliar é identificado como CCDA e cada tiristor de neutro é acionado, ao aplicar ao tiristor um pulso entre o gate e o catodo e estando o tiristor diretamente polarizado; o tiristor de neutro deixa de conduzir quando é cortado o sinal de disparo gate-catodo e não está polarizado diretamente.

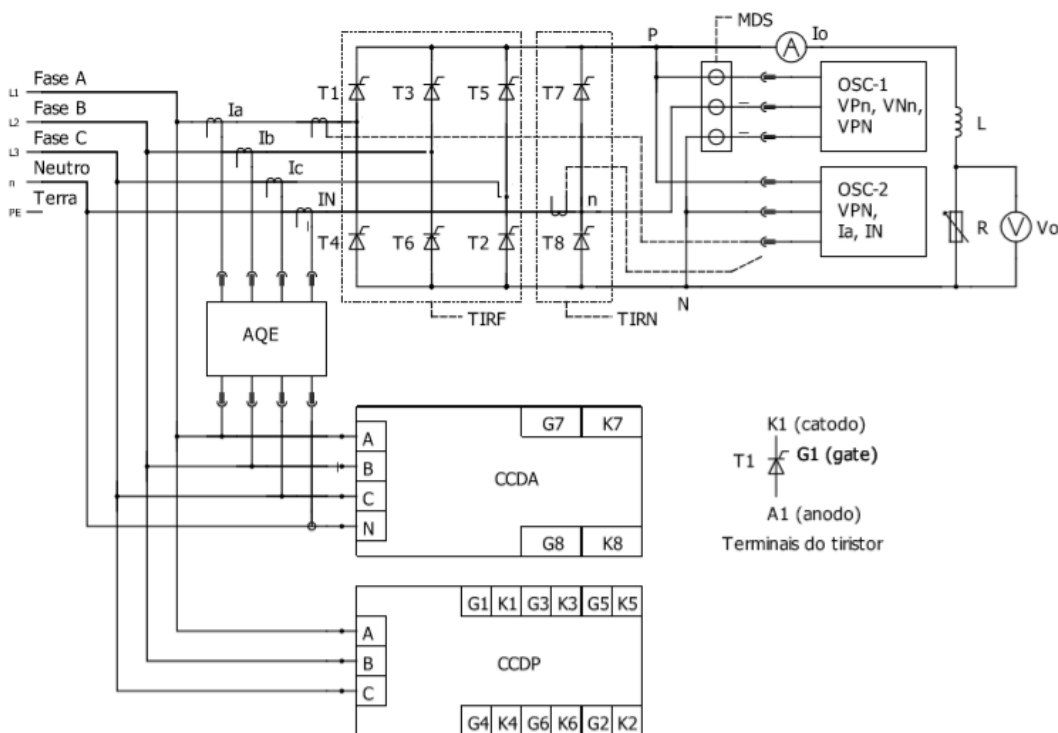


Figura 30: Ponte modificada controlada (adaptado de [2], [21], [32])

3.2 Placa eletrônica de 6 pulsos

Os estudos de G.R.S. Mendonça 2002 [27] e M.C. Cardoso 2016/2017 [28] apresentam uma placa eletrônica de 6 pulsos. Esta placa eletrônica foi utilizada como base para a proposta de disparo tanto dos tiristores de fase, quanto dos tiristores de neutro. Nesta seção são mostradas as funcionalidades da placa eletrônica e nas seções adiante são mostrados os circuitos de controle de disparo principal (CCDP), responsáveis pelo disparo dos tiristores de fase, bem como o circuito de disparo de controle auxiliar (CCDA) responsável pelo disparo dos tiristores de neutro.

Na Figura 31 é apresentado o diagrama de blocos da placa eletrônica de 6 pulsos. A placa eletrônica é composta de seis pistas, sendo três pistas superiores e três pistas inferiores; as três pistas superiores são dedicadas ao disparo dos tiristores superiores T1 (G1-K1), T3 (G3-K3), e T5 (G5-K5) e as pistas inferiores são dedicadas ao disparo dos tiristores inferiores T4 (G4-K4), T6 (G6-K6) e T2 (G2-K2); cada pista dispõe de quatro estágios (1, 2, 3, 4) e seus respectivos sinais de saída (V1, V2, V3, V4).

O estágio “1” foi concebido com base no circuito integrado TCA 785, aplicado no controle de ângulos de disparo de tiristores continuamente de 0° a 180° . Conforme mostrado na Figura 31 e na Figura 33b, cada TCA 785 recebe um sinal de referência de tensão CC de 0VCC a 10VCC; conforme mostrado na Figura 31 e na Figura 33a, cada TCA 785 recebe um sinal de tensão CA de sincronismo de fase do sistema elétrico V_{an} , V_{bn} , V_{cn} .

O estágio “2” foi concebido com base no circuito integrado 555, que opera como monoestável, e é responsável pelo alargamento do pulso enviado do TCA 785.

O estágio “3” foi concebido com base no TIL 113, um opto-acoplador, com a função de transmitir o pulso para o estágio seguinte e prover o isolamento galvânico entre os circuitos de alta e baixa potência.

O estágio “4” foi desenvolvido com base nos transistores BC 548 e BD 135, é denominado de estágio de ataque e reúne as funções de: amplificação dos sinais de comando oriundos dos estágios anteriores; características de fonte de corrente; bloqueio de aplicação de tensão negativa nos terminais gate-catodo do tiristor.

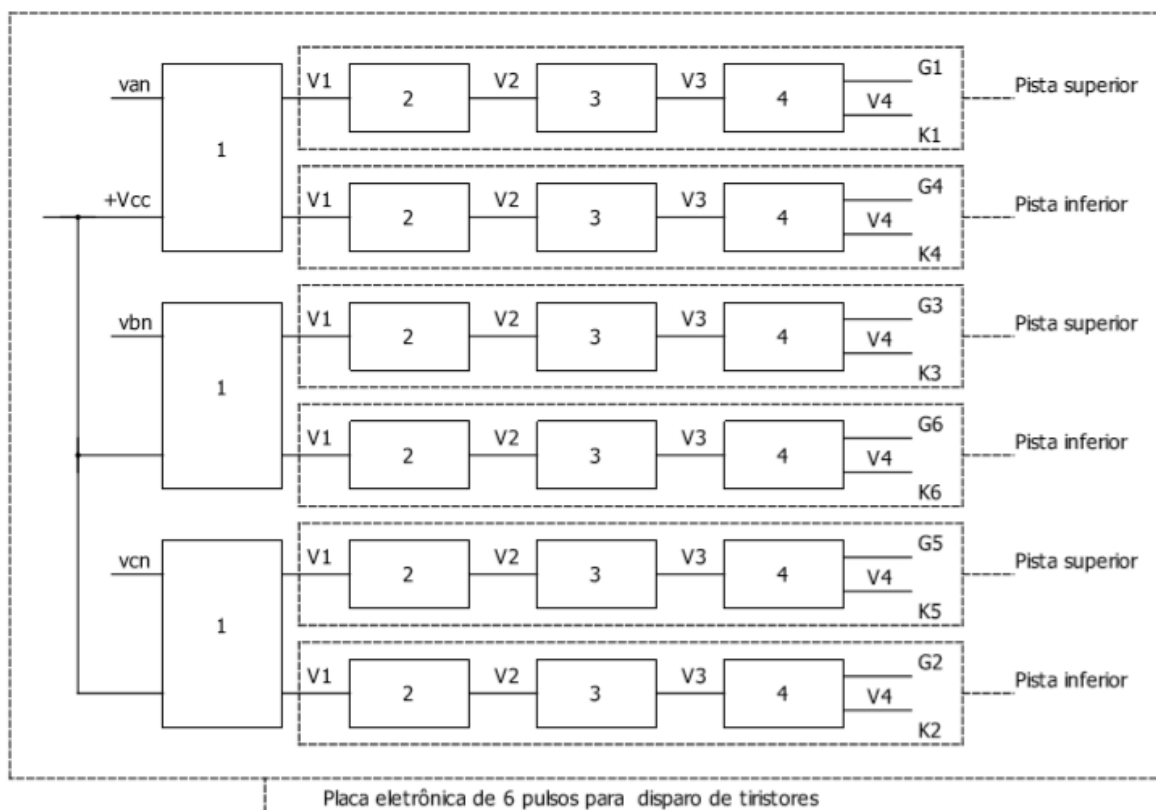


Figura 31: Diagrama de blocos – placa eletrônica de 6 pulsos (adaptado de [27], [28], [31], [33])

Na Figura 32 é mostrado o diagrama de blocos interno do TCA 785, conforme G.R.S. Mendonça 2002 [27], M.C. Cardoso 2016/2017 [28] e SIEMENS 2018 [29]. As funções das pinagens são: “1” => terra; “2” => saída 2 invertida; “3” => saída U; “4” => saída 1 invertida; “5” => tensão de sincronismo; “6” => inibidor de saída; “7” => saída Z; “8” => tensão estabilizada de referência; “9” => resistência de rampa; “10” => capacitância de rampa; “11” => tensão de controle; “12” => capacitância de extensão de pulso; “13” => pulso longo; “14” => saída 1; “15” => saída 2; “16” => tensão de alimentação.

O TCA 785 é provido de várias funcionalidades, por exemplo:

- a) sinal de sincronismo, obtido a partir de uma tensão de alimentação externa no pino 16, que passa por uma resistência de alto valor.
- b) detector de zero, para avaliar as passagens nulas e suas transferências para o registrador de sincronização;

- c) registro de sincronização que controla o gerador de rampa, cujo capacitor (C10) é carregado por uma corrente constante (determinada por R9);
- d) sinal processado para a lógica, se a tensão de rampa no pino 10 (V10) exceder a tensão de controle do pino 11 (V11 – ângulo de disparo φ);
- e) ângulo de disparo φ com deslocamento entre 0° e 180° , que depende da magnitude da tensão de controle do pino 11 (V11);
- f) pulso positivo de aproximadamente $30 \mu\text{s}$ de duração no pino 14 (Q1) e no pino 15 (Q2), para cada meia onda;
- g) prolongamento de duração de pulso até 180° , por meio de um capacitor (C12) conectado no pino 12;
- h) pulsos com duração entre φ e 180° , desde que o pino 12 esteja conectado à terra;
- i) geração de sinais inversos nos pinos 4 ($\overline{Q1}$) e no pino 2 ($\overline{Q2}$);
- j) disponibilidade de sinal $\varphi + 180^{\circ}$ no pino 3 (QU), para controle de lógica externa;
- k) sinal NOR no pino 7, correspondente ao link devido aos sinais do pino 14 (Q1) e do pino 15 (Q2);
- l) entrada de inibição para desabilitar as saídas do pino 14 (Q1), do pino 15 (Q2), do pino 4 ($\overline{Q1}$) e do pino 2 ($\overline{Q2}$);
- m) utilização do pino 13 como extensão das saídas dos pinos 4 ($\overline{Q1}$) e do pino 2 ($\overline{Q2}$), bem como do alongamento total do pulso ($180^{\circ} - \varphi$).

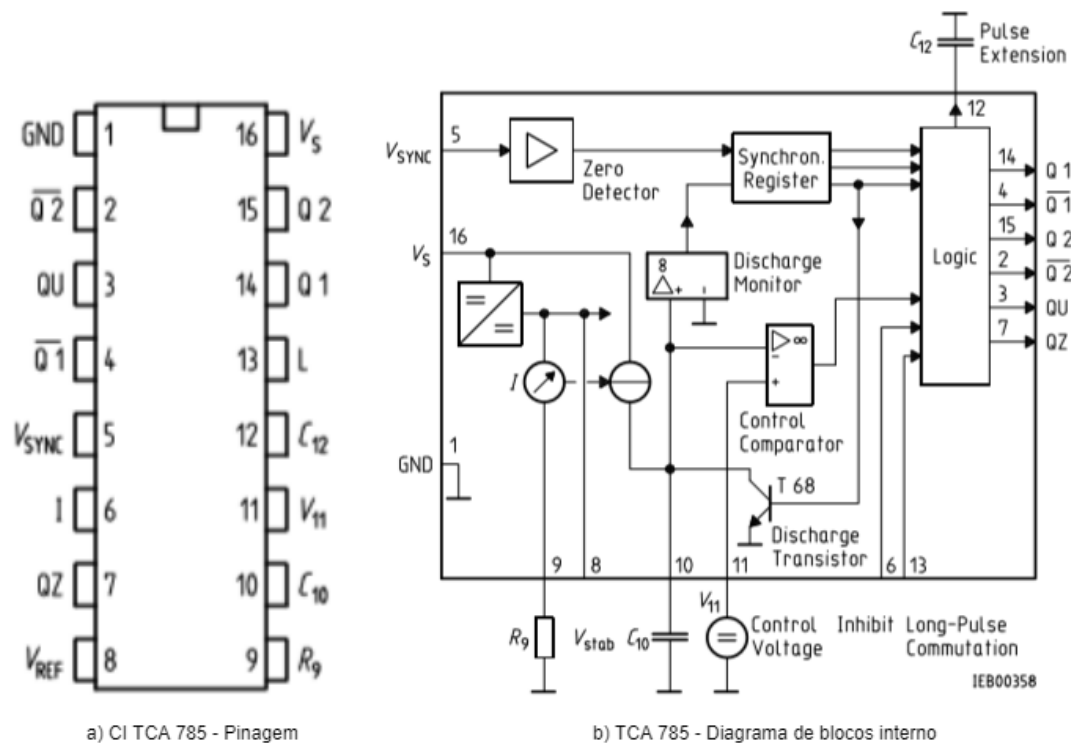
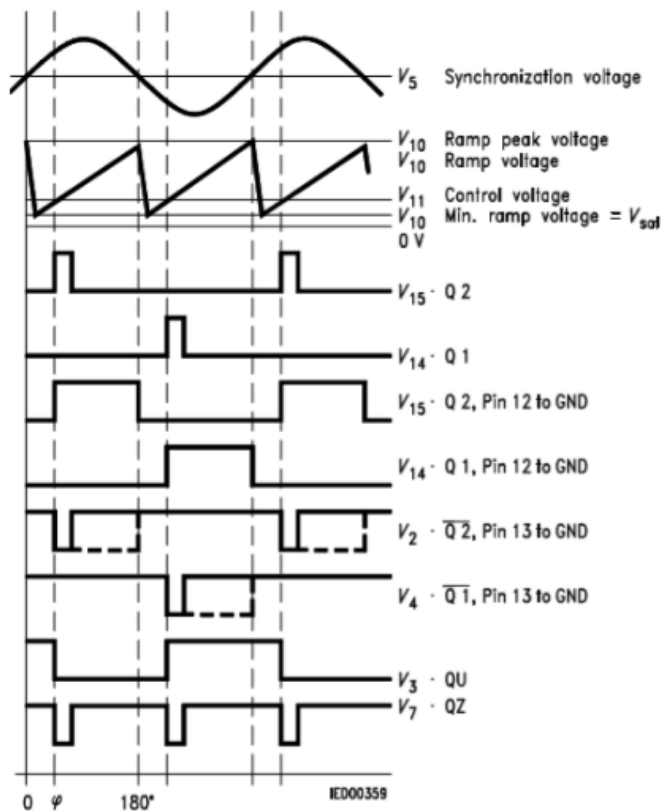
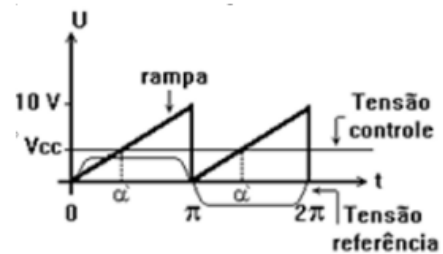


Figura 32: TCA 785 – pinagem e diagrama de blocos (adaptado de [23], [27-29])

Na Figura 33 são mostradas as formas de onda, os pulsos e o método de rampa de disparo do TCA 785. Quando a tensão de referência no pino 5 é zero, uma rampa é gerada no pino 10; o sinal de rampa é comparado com um sinal de controle V_{cc} , variando de 0 a 10V, gerando um pulso de disparo para o tiristor 1 (semi-ciclo positivo da tensão de referência ceifada pelos diodos conectados em anti-paralelo na entrada do pino 5) e para o tiristor 4 (semi-ciclo negativo da tensão de referência ceifada pelos diodos conectados em anti-paralelo na entrada do pino 5) no circuito do primeiro TCA 785, para os tiristores 3 e 6 no circuito do segundo TCA 785 e para os tiristores 5 e 2 no circuito do terceiro TCA 785. Analogamente, aos circuitos do primeiro TCA 785 (pulsos 1 e 4 gerados), pulsos para os tiristores 3 e 5 gerados nos semi-ciclos positivos da tensão de referência e 6 e 2 gerados nos semi-ciclos negativos da tensão de referência.



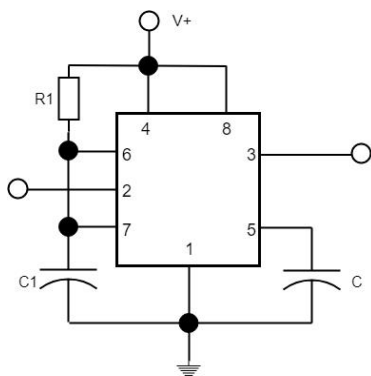
a) TCA 785 - Formas de onda



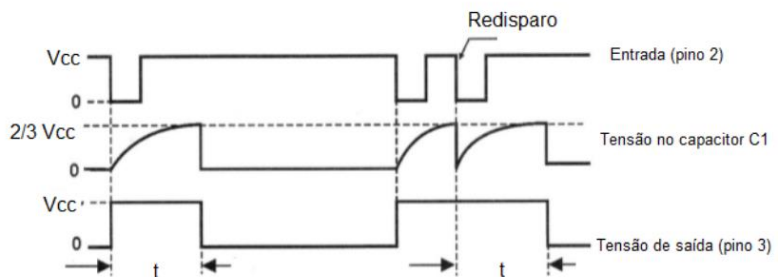
b) TCA 785 - Método de rampa de disparo

Figura 33: TCA 785 - formas de onda / rampa de disparo (adaptado de [27-29])

Na Figura 34 é mostrado o circuito integrado 555, conexão monoestável. Os pinos do CI 555 são identificados por: (1) – terra; (2) disparo; (3) saída; (4) reset; (5) V_{cc} ; (6) descarga; (7) limiar; (8) tensão de controle.



a) CI 555 - Conexão monoestável



b) CI 555 - Diagrama no tempo

Figura 34: CI 555 – configuração monoestável (adaptado de [27-28], [30])

G.R.S. Mendonça 2002 [27] e M.C. Cardoso 2016/2017 [28] salientam que o circuito integrado 555 da Figura 35 opera efetivamente como monoestável, somente

se todos os pinos “1” estiverem aterrados no mesmo ponto de aterramento da fonte simétrica, ou seja, no ponto de aterramento comum.

Na Figura 35 é mostrado o circuito de ajuste de largura de pulso do circuito integrado 555, operando como monoestável.

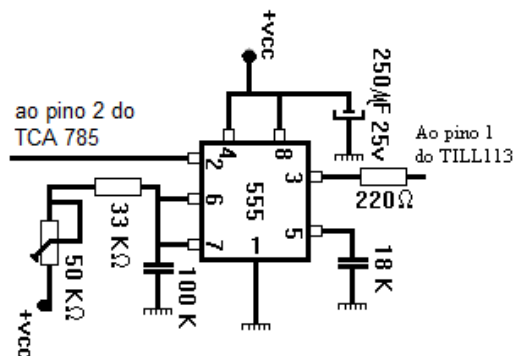


Figura 35: CI 555 – ajuste de largura de pulso (adaptado de [27-28])

Na Figura 36 é mostrado o diagrama interno do TIL 113. O TIL 113 é um optoacoplador com LED emissor de infravermelho, entre os pinos 1 e 2, e um fototransistor NPN Darlington nos pinos 4, 5 e 6.

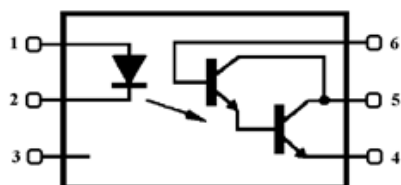


Figura 36: TIL 113 – diagrama interno (adaptado de [27-28])

G.R.S. Mendonça 2002 [27] e M.C. Cardoso 2016/2017 [28] referenciam o circuito da Figura 37 como circuito de ataque. O circuito de ataque tem a função de:

- a) isolar as etapas de potência e de comando;
- b) amplificar o sinal do circuito de comando;
- c) gerar a corrente necessária ao disparo do tiristor;
- d) impedir tensões negativas na junção gate-catodo do tiristor.

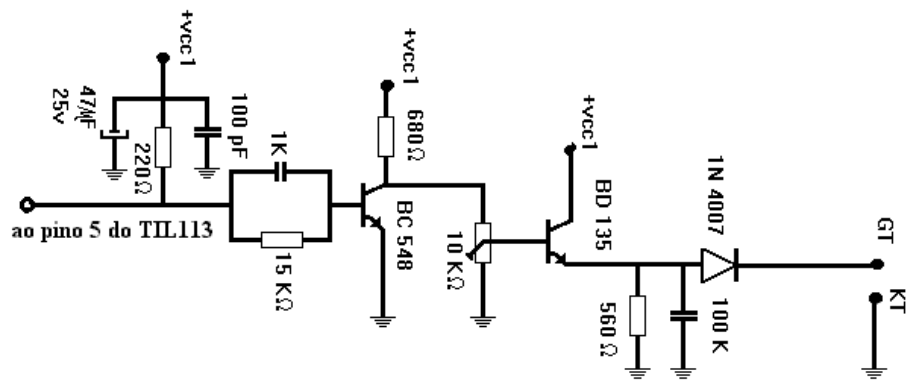


Figura 37: Diagrama do circuito de ataque (adaptado de [27-28])

Na Figura 38 é mostrada a placa eletrônica de 6 pulsos para disparo de tiristores.

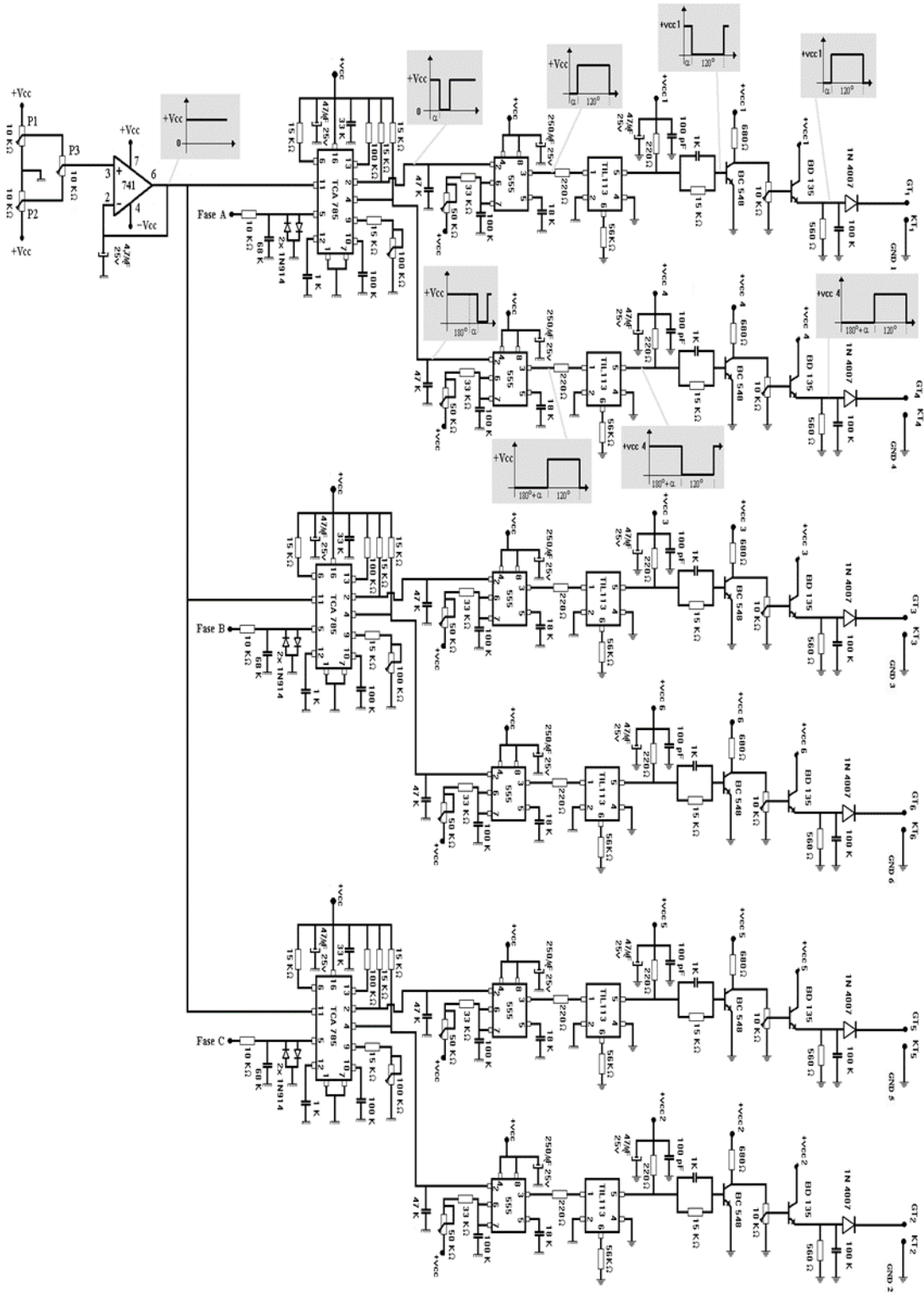


Figura 38: Placa eletrônica de 6 pulsos para disparo de tiristores (adaptado de [22,23,27,31], com os pinos "1" dos CI 555 aterrados)

3.3 Circuito de controle de disparo principal

Nos estudos de G.R.S. Mendonça 2002 [27] e M.C. Cardoso 2016/2017 [28] foi desenvolvida uma placa eletrônica de 6 pulsos, para o acionamento de ponte retificadora trifásica de seis tiristores, configuração Graetz. A placa eletrônica de 6 pulsos será utilizada para o disparo dos tiristores de fase e dos tiristores de neutro da ponte modificada controlada.

Da Figura 30, observa-se que o circuito de controle de disparo principal (CCDP) é responsável pelo funcionamento da bancada de teste no modo de operação 2, ou seja, é responsável pelo disparo dos tiristores de fase; observa-se também que o circuito de potência dos tiristores de fase (T1-T4, T3-T6, T5-T2) são alimentados pelas tensões (A, B, C) do sistema elétrico de potência. Desta forma, conforme mostrado na Figura 30, tomou-se como referência de alimentação do CCDP, as mesmas tensões (A, B, C) que alimentam o circuito de potência, sendo estas as bases de referência de sincronismo de disparo dos tiristores de fase.

Na Figura 39 é apresentado o diagrama de blocos com a topologia do circuito de controle de disparo principal (CCDP) utilizado para os tiristores de fase da ponte modificada controlada. As referências de sincronismo de tensão da placa eletrônica são obtidas por três transformadores monofásicos (TRAFO 1, TRAFO 2, TRAFO 3), conectados entre si em uma ligação do tipo delta (Δ) no lado primário (entrada) e estrela com neutro acessível (Y_n) no lado secundário (controle); acrescentando a isto, é disponibilizado um sinal de tensão em CC para a placa eletrônica, a partir de um sistema de retificação (RET) alimentado por um dos transformadores (TRAFO 1).

Os tiristores de fase são disparados pelos sinais gerados nas pistas superiores e inferiores da placa eletrônica (ver Figura 39). Os sinais de saída das pistas superiores da placa eletrônica (G1-K1, G3-K3, G5-K5) são dedicados ao disparo dos tiristores de fase superiores da ponte modificada controlada (T1, T3, T5); os sinais de saída das pistas inferiores da placa eletrônica (G4-K4, G6-K6, G2-K2) são dedicados ao disparo dos tiristores de fase inferiores da ponte modificada controlada (T4, T6, T2).

O ajuste do CCDP é feito pelo ângulo de disparo “ α ”, gerado pelo sinal da tensão +VCC de referência e da tensão de sincronismo a ser aplicada na carga, oriunda dos transformadores ligação Δ -Yn mostradas na Figura 30 e na Figura 39. A placa eletrônica de disparo de 6 pulsos opera no intervalo de 0° a 180° , conforme G.R.S. Mendonça 2002 [27]; o ângulo de disparo principal da ponte modificada controlada trabalhando como retificador opera na faixa de $0^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$, sendo um pouco menor devido à margem de comutação, conforme V.R. Stefanovic 1979 [2].

Segundo Y.R. de Souza 2014 [26], os tiristores da ponte conversora de seis pulsos, configuração Graetz, são chaveados em uma sequência determinada, de modo que a corrente passe pelas fases do conversor de forma alternada. A alternância entre uma fase e a fase seguinte é conhecida como comutação “ μ ”, associada ao intervalo de tempo finito para que este processo ocorra, sendo que a comutação: altera em função da reatância do transformador do conversor, do ângulo de disparo, da tensão CA na barra do conversor e da corrente CC; aumenta com o aumento da reatância e/ou da corrente CC; reduz com o aumento da tensão CA e/ou do ângulo de disparo; apresenta valores menores que 60° , de modo a evitar sobreposição de comutação. Salienta-se que o ângulo de comutação $\mu > 60^\circ$ provoca a sobreposição de comutação e um curto entre três fases simultaneamente, e o circuito de disparo não funciona adequadamente para ponte conversora de seis pulsos, pois a comutação da ponte conversora de seis pulsos acontece a cada 60° .

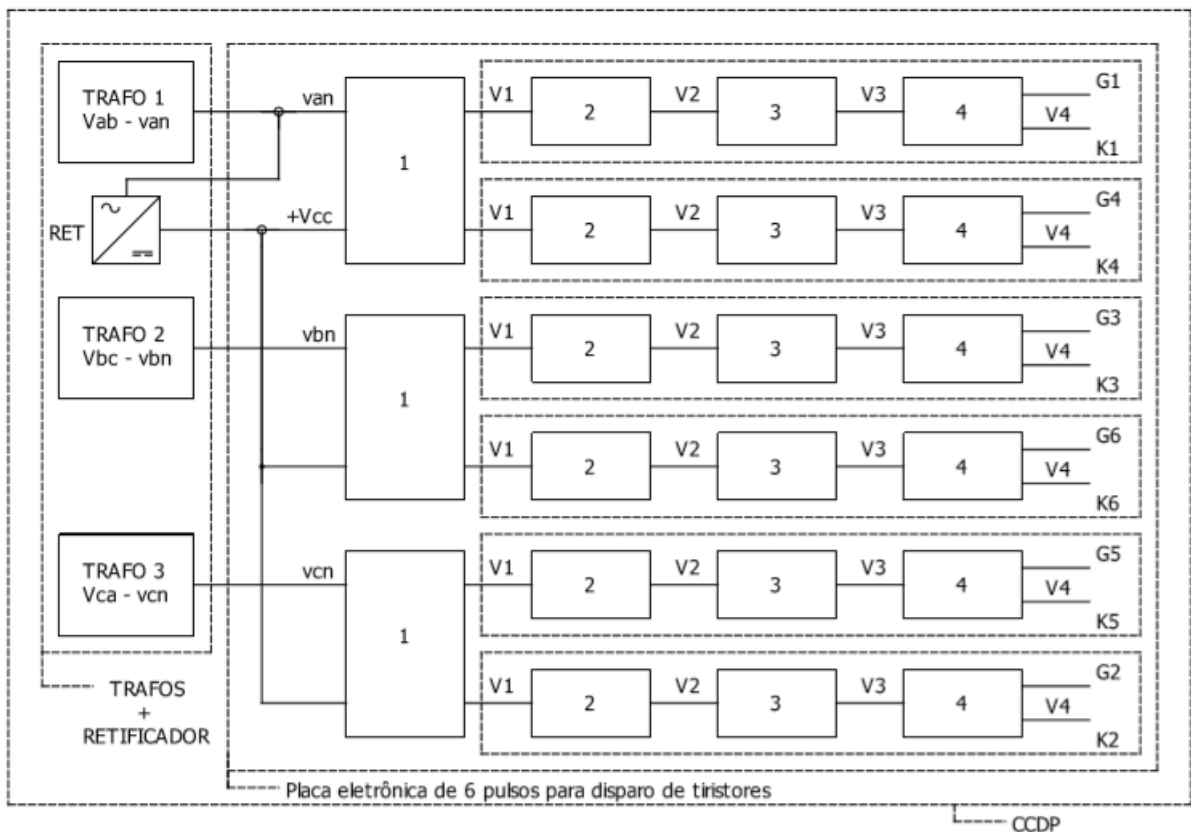


Figura 39: Diagrama de blocos – disparo principal (adaptado de [33])

3.4 Circuito de controle de disparo auxiliar

Da mesma forma que para o CCDP, foi utilizada a placa eletrônica de 6 pulsos dos estudos de G.R.S. Mendonça 2002 [27] e M.C. Cardoso 2016/2017 [28], como base para o desenvolvimento do circuito de controle de disparo auxiliar (CCDA) para o acionamento dos tiristores de neutro (T7, T8) da ponte modificada controlada.

Da Figura 30, observa-se que o circuito de controle auxiliar (CCDA) é um dos responsáveis pelo funcionamento da bancada de teste no modo de operação 1 (bancada de teste operando como ponte modificada controlada), ou seja, é responsável pelo disparo dos tiristores de neutro; observa-se também que o circuito de potência dos tiristores de neutro (T7, T8) são alimentados pelo neutro (N) do sistema elétrico de potência. Desta forma, conforme mostrado na Figura 30, tomou-se como referência de alimentação do CCDA, as mesmas tensões fase-neutro (AN, BN, CN) que alimentam o circuito de potência, sendo estas as bases de referência de sincronismo de disparo dos tiristores de neutro.

Na Figura 40 é apresentado o diagrama de blocos com a topologia do circuito de controle de disparo auxiliar (CCDA) utilizado para acionamento dos tiristores de neutro da ponte modificada controlada. As referências de sincronismo de tensão da placa eletrônica são obtidas por três transformadores monofásicos (TRAFO 1, TRAFO 2, TRAFO 3), conectados entre si em uma ligação do tipo estrela com neutro acessível (Y_n) no lado primário (entrada) e estrela com neutro acessível (Y_n) no lado secundário (controle); acrescentando a isto, é disponibilizado um sinal de tensão em CC para a placa eletrônica, a partir de um sistema de retificação (RET) alimentado por um dos transformadores (TRAFO 1).

Os tiristores de neutro são disparados pelos sinais gerados nas pistas superiores e inferiores da placa eletrônica, conforme mostrado na Figura 40. O somatório dos sinais de saída das pistas superiores da placa eletrônica (G1-K1, G3-K3, G5-K5) são feitos pelo módulo de diodos MD1 para o disparo do tiristor de neutro inferior da ponte modificada controlada (T8); o somatório dos sinais de saída das pistas inferiores da placa eletrônica (G4-K4, G6-K6, G2-K2) são feitos pelo módulo de diodos MD2 para o disparo do tiristor de neutro superior da ponte modificada controlada (T7).

Nota: As tensões fase-neutro de referência do circuito de potência oriundas de três transformadores, ligação Y_n - Y_n , disponibilizam as tensões de sincronismo do circuito de potência para a placa eletrônica de 6 pulsos; os somatórios dos sinais na saída da placa eletrônica para disparo dos tiristores de neutro, caracterizam a influência do neutro do circuito de potência no disparo dos tiristores de neutro, conforme mostrado na Figura 30 e na Figura 40.

O CCDA foi concebido com base na mesma placa eletrônica que concebeu o CCDP, desta forma, valem as mesmas considerações apresentadas por G.R.S. Mendonça 2002 [27]. O ajuste do CCDA é feito pelo ângulo de disparo " δ ", gerado pelo sinal da tensão +VCC de referência e da tensão de sincronismo, oriunda dos transformadores ligação Y_n - Y_n , a ser aplicada na carga, mostrado na Figura 30 e na Figura 40. O ângulo de disparo do CCDA varia no intervalo de 0° a 180° e o ângulo de disparo auxiliar δ dos tiristores 7 e 8 varia no intervalo de 0° a 120° , para cada referência de sincronismo.

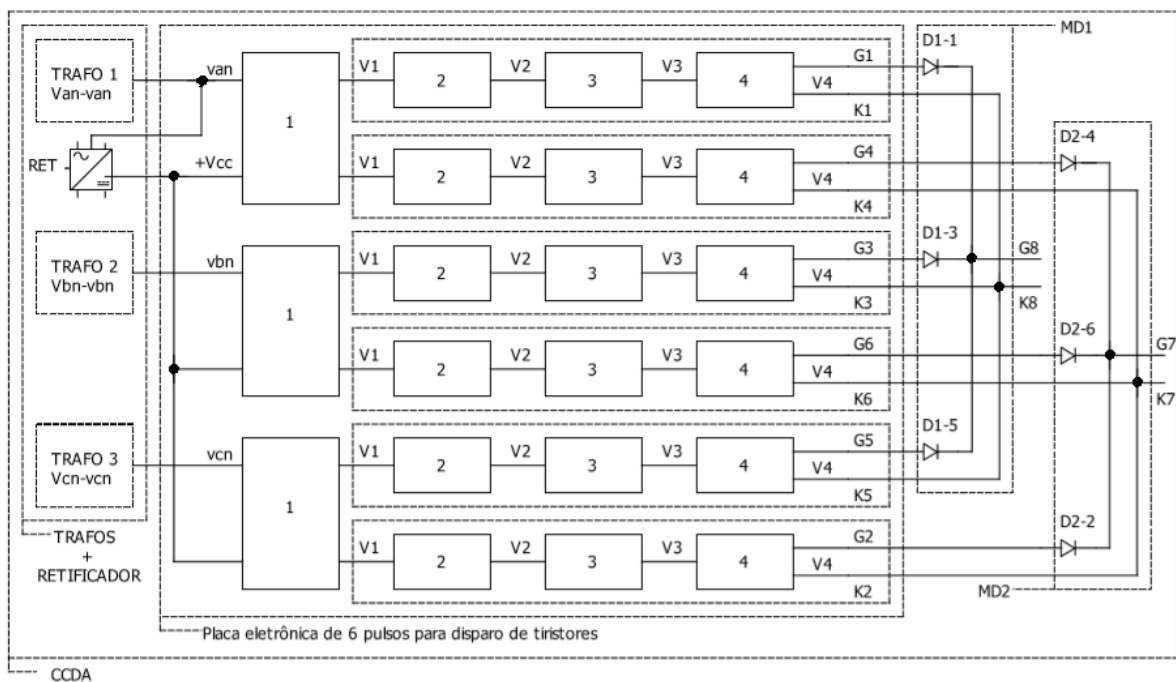


Figura 40: Diagrama de blocos – disparo auxiliar (adaptado de [33])

3.5 Circuito de controle de disparo da bancada de teste

Foram montados os circuitos de controle de disparo de 6 pulsos principal e auxiliar, conforme mostrados nos diagramas de blocos da Figura 39 e Figura 40. Nestes circuitos foram explorados os estágios das placas eletrônicas, principalmente no que se refere ao ângulo de disparo, à largura de pulso e à amplitude de pulso. O aprendizado permitiu entender o funcionamento e ajustes dos circuitos de disparo, porém as sucessivas falhas (rompimento de fiação, mau contato, falha intermitente, queima de componente), forçaram a busca de alternativa que permitisse a realização dos testes sem necessidade de paradas intempestivas.

Com o conhecimento adquirido, optou-se por utilizar módulos didáticos de disparo disponíveis no laboratório, com características de funcionamento similares às apresentadas neste CAPÍTULO. Utilizou-se, assim, um rack da DATAPOOL ELETRÔNICA LTDA [35], provido de: um módulo fonte de alimentação fixa em corrente contínua; um módulo de fusíveis de proteção (referência PCB 9943); um módulo de disparo trifásico de 6 pulsos com terminais acessíveis configuráveis (Δ -Yn) e medição digital de ângulo de disparo principal (referência PCB 9940); um módulo de disparo trifásico de 6 pulsos com terminais acessíveis configuráveis (Yn-Yn) e

medição digital de ângulo de disparo auxiliar (referência PCB 9940). Para gerar os pulsos necessários ao disparo dos tiristores de fase, foi necessário aumentar a largura de pulso e a altura de pulso, do módulo de disparo principal (referência PCB 9940).

Para gerar os pulsos necessários ao disparo dos tiristores de neutro foram adicionados dois módulos de diodos (MD1, MD2) a serem acoplados nas saídas do módulo de disparo auxiliar (referência PCB 9940) da DATAPOOL ELETRÔNICA LTDA [35], da forma mostrada no diagrama de blocos da Figura 40.

4 IMPLEMENTAÇÃO DA BANCADA DE TESTE

4.1 Geral

A bancada de teste foi desenvolvida e implementada no laboratório do ISEE da UNIFEI (Instituto de Sistemas Elétricos e Energia da Universidade Federal de Itajubá). A bancada é uma ponte conversora CA-CC, funciona como um retificador controlado, configuração Graetz, alimentada por um sistema elétrico trifásico a 4 fios. A bancada é equipada com oito tiristores (seis tiristores de fase e dois tiristores de neutro) e dois circuitos de controle de disparo independentes de 6 pulsos (disparo principal e disparo auxiliar). A bancada funciona em dois modos de operação; no modo de operação 1, a bancada funciona como uma ponte modificada controlada (seis tiristores de fase, dois tiristores de neutro, um disparo principal e um disparo auxiliar); no modo de operação 2, a bancada funciona como uma ponte convencional (seis tiristores de fase e um disparo principal).

Se faz necessário instrumentar a bancada de teste para proporcionar avaliações não só de fator de potência, mas também avaliações secundárias e não menos importantes para obtenção de resultados consistentes. Desta forma, com a bancada de teste, serão avaliados os resultados experimentais e comparados com os resultados teóricos da ponte modificada controlada e da ponte convencional.

Na Figura 30 é mostrado o diagrama elétrico da bancada de teste da Figura 41. As principais partes da bancada de teste são:

- a) Analisador de qualidade de energia (AQE1) com recursos para medição e armazenamento de dados do sistema elétrico, tais como: distorção harmônica individual e total de corrente, fator de potência, fator de deslocamento, tensão fase-neutro, tensão fase-fase, correntes de entrada, potência ativa por fase e trifásica, potência reativa por fase e trifásica, potência aparente por fase e trifásica, espectros harmônicos, formas de onda de tensão e corrente.
- b) Analisador de qualidade de energia (AQE2) com recursos para medição de dados do sistema elétrico, tais como: distorção harmônica individual e total de corrente, fator de potência por fase e trifásico, fator de deslocamento por fase e trifásico, tensão fase-neutro, tensão fase-fase, correntes de entrada,

potência ativa por fase e trifásica, potência reativa por fase e trifásica, potência aparente por fase e trifásica.

- c) Circuito de potência tiristorizado (TIRF), composto por tiristores alimentados pelas tensões oriundas das fases do sistema elétrico de potência (A, B, C).
- d) Circuito de potência tiristorizado (TIRN), composto por tiristores alimentados pelo cabo oriundo da referência de neutro do sistema elétrico de potência.
- e) Circuito de controle configurável, independente e ajustável por um ângulo de disparo " α ", para acionamento dos tiristores de fase da ponte conversora, também chamado de disparo principal (CCDP).
- f) Circuito de controle configurável, independente e ajustável por um ângulo de disparo " δ ", para acionamento dos tiristores de neutro da ponte conversora, também chamado de disparo auxiliar (CCDA).
- g) Módulos de diodos (MD1 e MD2) para gerar os sinais necessários ao disparo dos tiristores de neutro.
- h) Módulo de resistência elétrica (R), munido de chaves seletoras para ajuste da carga elétrica ôhmica.
- i) Módulo de reatância elétrica (L), munido de volante variável de 0% a 100% para ajuste da reatância a ser instalada em série à carga elétrica ôhmica.
- j) Multímetro digital de corrente em CC (A) para monitoramento do nível de corrente de saída em CC na carga elétrica ôhmica.
- k) Multímetro digital de tensão em CC (V), para monitoramento da tensão média de saída em CC.
- l) Módulo divisor de sinal (MDS) de acoplamento das tensões em CC medidas nos tiristores de neutro (VP_n , VN_n) e na saída da bancada de teste (VP_N), para monitoramento das formas de onda de tensão, em osciloscópio.
- m) Osciloscópio de três canais (OSC-1) provido de módulo matemático para composição de formas de onda (ex.: $VP_N = VP_n - VN_n$) e monitoramento de formas de onda (ex.: VP_N , VP_n , VN_n).
- n) Osciloscópio de três canais (OSC-2) provido de módulo matemático para composição de formas de onda e monitoramento de formas de onda (ex.: VP_N , I_a , I_N).

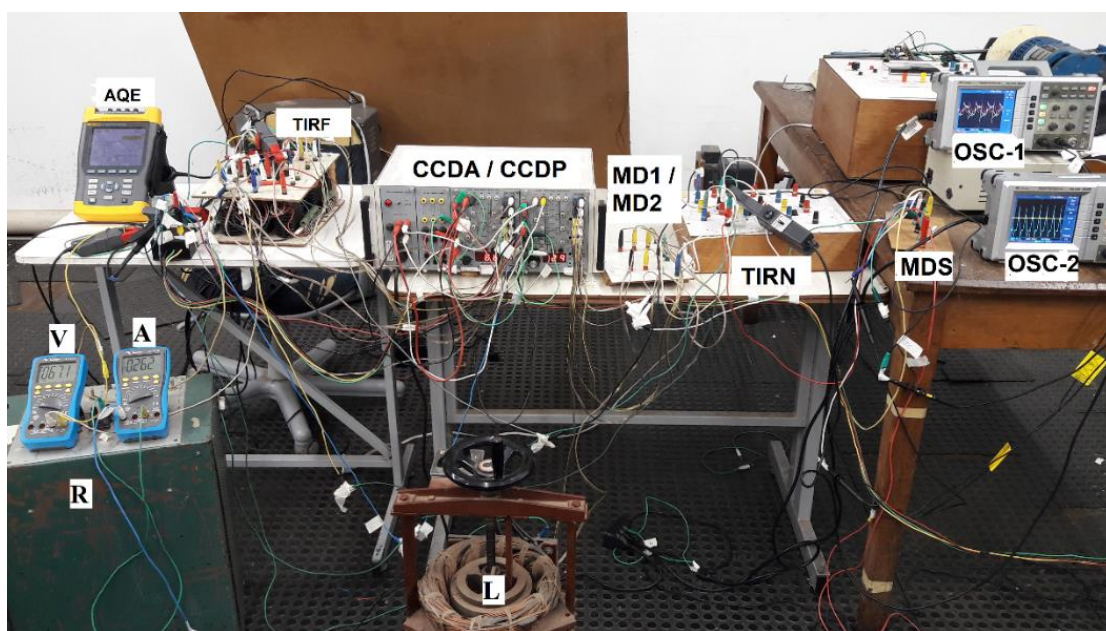


Figura 41: Bancada de teste

4.2 Modos de operação da bancada de teste

A bancada de teste funciona em dois modos de operação: modo de operação 1 e modo de operação 2.

No modo de operação 1, a bancada de teste trabalha como ponte modificada controlada, ou seja: são energizados os circuitos de potência dos tiristores de fase e dos tiristores de neutro; são energizados os circuitos de disparo dos tiristores de fase e dos tiristores de neutro; são selecionadas as chaves de largura de pulso (Pulso Curto / Pulso Largo) dos tiristores de fase e dos tiristores de neutro; é ajustado o dial de ângulo de disparo auxiliar (δ) dos tiristores de neutro até o valor desejado; é ajustado o dial de ângulo de disparo principal (α) até que a tensão média de saída em CC (V_o) atinja o valor teórico calculado pela equação (40).

No modo de operação 2, a bancada de teste trabalha como ponte convencional, ou seja: são energizados os circuitos de potência dos tiristores de fase e dos tiristores de neutro; é energizado o circuito de disparo dos tiristores de fase e desenergizado o circuito de disparo dos tiristores de neutro; é selecionada a chave de largura de pulso (Pulso Curto / Pulso Largo) dos tiristores de fase; é ajustado o dial de ângulo de disparo principal (α) até que a tensão de saída em CC (V_o) da ponte convencional opere com o mesmo valor médio da tensão de saída em CC (V_o) da ponte modificada

controlada para ângulos de disparo principal e auxiliar conhecidos, conforme notas “a)”, “b)” e “c)”.

Notas:

- a) Conhecidos os ângulos de disparo principal e auxiliar, com base na equação (40) calcula-se o valor médio da tensão de saída em CC (V_o).
- b) Conhecido o valor médio da tensão de saída em CC (V_o), calculado a partir da equação (40), pode-se calcular o ângulo de disparo necessário para manter a ponte convencional com o mesmo valor médio da tensão de saída em CC da ponte modificada controlada (V_o).
- c) O ajuste do ângulo de disparo da ponte convencional é obtido de tal forma que o valor médio da tensão de saída em CC da ponte convencional seja igual ao valor médio da tensão de saída em CC da ponte modificada controlada, denominado de critério da mesma tensão média de saída em CC ou critério do mesmo valor médio.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Geral

Neste CAPÍTULO foram registrados os experimentos realizados na bancada de teste funcionando no modo de operação 1 (ponte modificada controlada) e no modo de operação 2 (ponte convencional).

Os experimentos foram realizados, com a bancada de teste funcionando em um primeiro momento no modo de operação 1, com ângulos de disparo principal e auxiliar conhecidos; em um segundo momento a bancada de teste foi colocada em funcionamento no modo de operação 2, com ângulo de disparo “ α ” ajustado de forma que a tensão média na saída da bancada de teste funcionando no modo de operação 2, obtivesse o mesmo valor da tensão média na saída da bancada de teste funcionando no modo de operação 1 com os ângulos de disparo “ α e δ ” conhecidos.

Todos os testes foram realizados na bancada utilizando uma carga RL única pré-estabelecida ($R = 137\Omega$; $L = 189,4\text{mH}$), seguindo as orientações do capítulo 4.

Para a bancada de teste funcionando no modo de operação 1 (ponte modificada controlada) são aplicadas as equações do item 2.4.3; para a bancada de teste funcionando no modo de operação 1 com $\delta = 0^\circ$ (ponte modificada semicontrolada) são aplicadas as equações do item 2.3.3; para a bancada de teste funcionando no modo de operação 2 (ponte convencional) são aplicadas as equações do item 2.2.3.

Os experimentos na bancada de teste são feitos com base no ajuste de tensão média de saída em CC nos terminais da bancada de teste, funcionando no modo de operação 1 ($V_o = f(\alpha, \delta)$) e no modo de operação 2 ($V_o = f(\alpha)$).

Conhecidos os ângulos de disparo da ponte modificada controlada, são feitos os seguintes cálculos teóricos:

- a) Tensão média de saída em CC da ponte modificada para o ângulo de disparo principal conhecido “ α ” e para o ângulo de disparo auxiliar $\delta = 0^\circ$;
- b) Tensão média de saída em CC para o ângulo de disparo principal conhecido “ α ” e para o ângulo de disparo auxiliar conhecido δ ;

- c) Ângulo de disparo principal da ponte convencional em CC, igualando a equação da tensão média de saída em CC da ponte modificada controlada à equação da tensão média de saída em CC da ponte convencional.

O ajuste da tensão média de saída em CC da bancada de teste é feito da seguinte maneira:

- a) Para o modo de operação 1 e $\delta = 0^0$, ajusta-se a bancada de teste para $\delta = 0^0$ e em seguida ajusta-se α até a bancada alcançar a tensão média de saída em CC calculada para α conhecido e $\delta = 0^0$;
- b) Para o modo de operação 1 e $\delta > 0^0$, ajusta-se a bancada de teste com $\delta = 0^0$ e após ajusta-se a tensão média de saída em CC para o valor calculado com α conhecido e $\delta = 0^0$, em seguida ajusta-se a bancada de teste para a tensão média em CC calculada para α e δ conhecidos;
- c) Para o modo de operação 2, desenergiza-se o circuito de controle de disparo auxiliar (CCDA), ajusta-se a bancada de teste até alcançar a tensão média de saída em CC calculada; em seguida anota-se o ângulo de disparo auxiliar α ajustado.

Na Figura 42 são mostradas as formas de onda de tensão e de corrente de entrada da fase A, considerando o critério da mesma tensão média em CC de saída, para a bancada de teste funcionando como ponte modificada controlada (modo de operação 1) e como ponte convencional (modo de operação 2). As formas de onda foram medidas e armazenadas no analisador de qualidade de energia (AQE1). A oscilografia apresentada na Figura 42 foi obtida para a ponte modificada controlada operando para o intervalo $30^0 < \alpha \leq 150^0$ e $\delta \geq 0^0$ e para a ponte convencional operando para o ângulo de disparo principal equivalente α , considerando o critério da mesma tensão média em CC de saída.

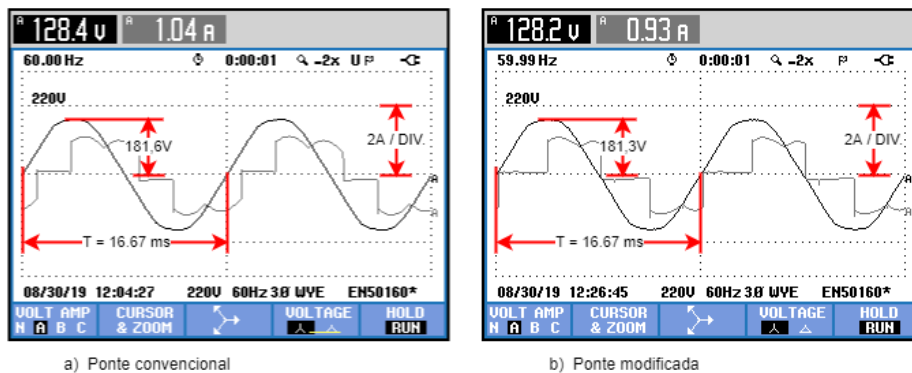


Figura 42: Tensão e corrente de entrada (fase A)

Durante os testes foram coletados diversos valores de grandezas elétricas registradas em um primeiro analisador de qualidade de energia (AQE1). Salienta-se que os resultados, em alguns casos, destoaram dos valores teóricos esperados, calculados a partir das referências bibliográficas; repetiu-se alguns testes com um segundo analisador de qualidade de energia (AQE2) e no CAPÍTULO 6 que trata da análise dos resultados teóricos e experimentais, este tema será abordado.

5.2 Bancada de teste operando no modo de operação 1 e no modo de operação 2

5.2.1 Geral

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais da bancada de teste feitos em laboratório, operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional. Os resultados servirão de base para analisar a proposta do tema em questão. Aqui serão analisados dois blocos de medições, a saber:

- Bancada de teste trabalhando no modo de operação 1 ($0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$) e seu equivalente para a bancada de teste trabalhando no modo de operação 2, considerando o critério da mesma tensão média de saída.
- Bancada de teste trabalhando no modo de operação 1 ($30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$) e seu equivalente para a bancada de teste trabalhando no modo de operação 2, considerando o critério da mesma tensão média de saída.

5.2.2 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 0^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 0^\circ$)

Na Figura 43 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 0^\circ$ e $\delta = 0^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 297,10V$. Na Figura 43a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A (VPN x I_a); na Figura 43b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro (VPN x I_N).

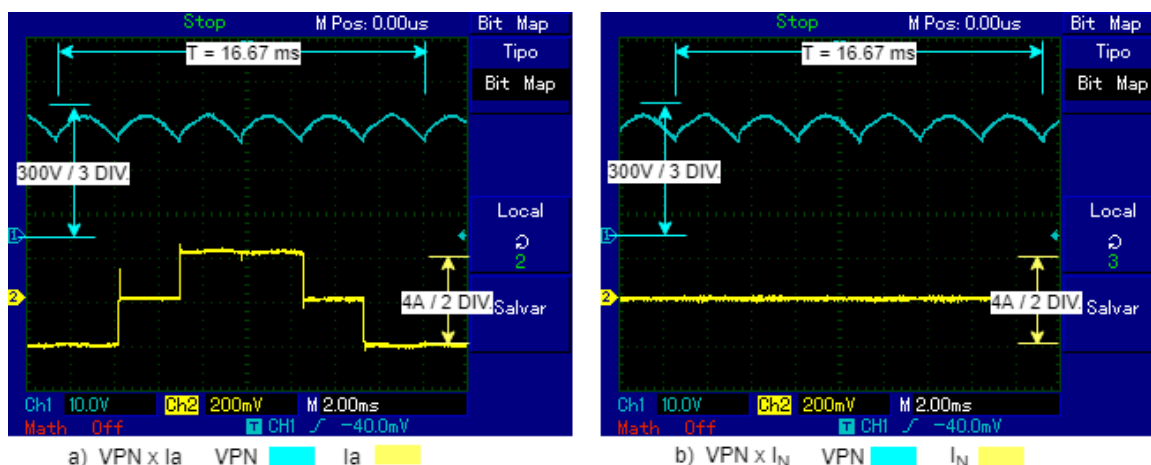


Figura 43: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 0^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

Na Figura 44 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 297,10V$.

Na Figura 44a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 0^\circ$ e $\delta = 0^\circ$.

Na Figura 44b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 0^\circ$ e $\delta = 0^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 0^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida

com dois analisadores de qualidade de energia diferentes; no primeiro e no segundo analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 0^{\circ}$.

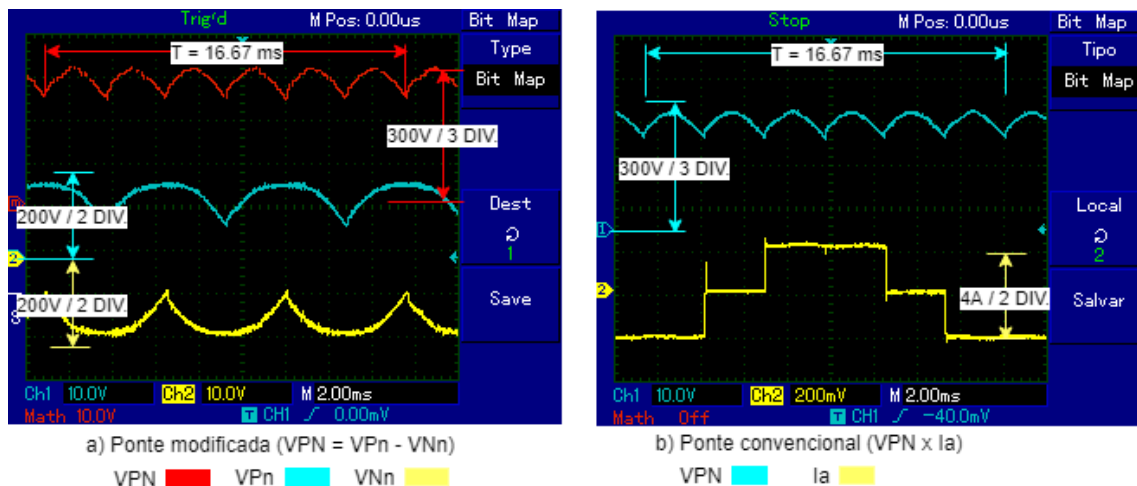


Figura 44: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 0^{\circ}$; $\delta = 0^{\circ}$)

5.2.3 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 0^{\circ}$; $\delta = 30^{\circ}$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 0^{\circ}$)

Na Figura 45 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 0^{\circ}$ e $\delta = 30^{\circ}$, com tensão média de saída $V_o = 297,10\text{V}$. Na Figura 45a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A (VPN x Ia); na Figura 45b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro (VPN x I_N).

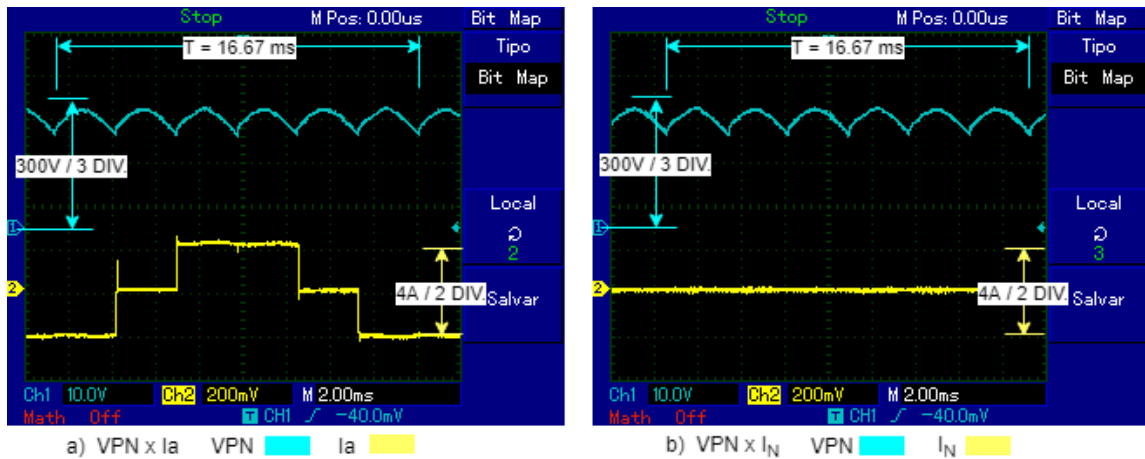


Figura 45: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 0^\circ$; $\delta = 30^\circ$)

Na Figura 46 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 297,10V$.

Na Figura 46a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 0^\circ$ e $\delta = 30^\circ$.

Na Figura 46b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 0^\circ$ e $\delta = 30^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 0^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com dois analisadores de qualidade de energia diferentes; no primeiro e no segundo analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 0^\circ$.

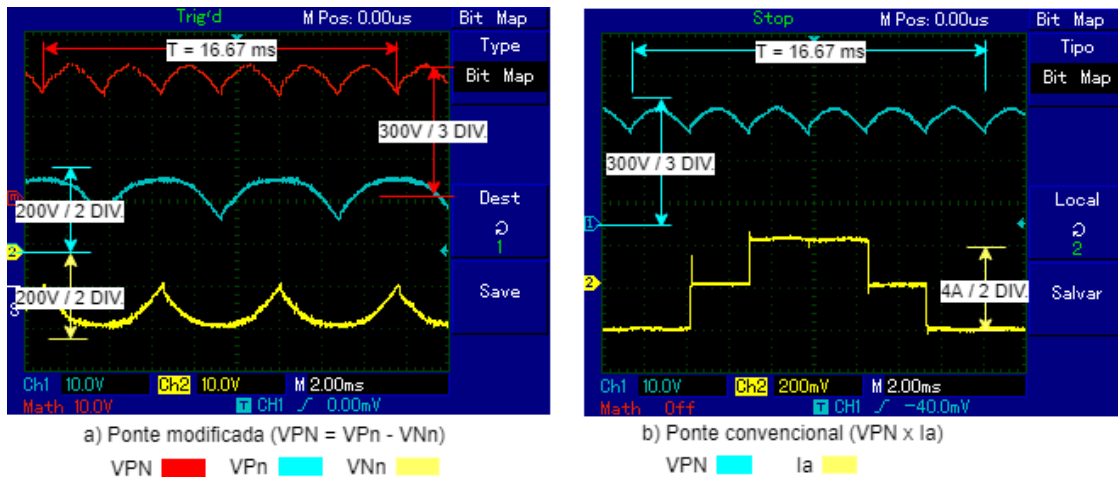


Figura 46: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 0^\circ$; $\delta = 30^\circ$)

5.2.4 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 30^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 30^\circ$)

Na Figura 47 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 30^\circ$ e $\delta = 0^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 257,30V$. Na Figura 47a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A ($VPN \times I_a$); na Figura 47b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro ($VPN \times I_N$).

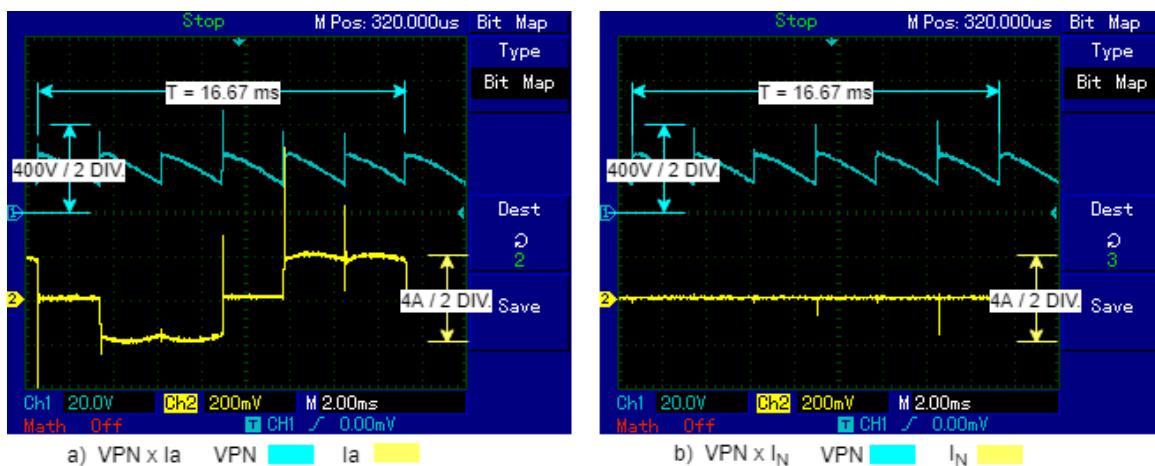


Figura 47: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 30^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

Na Figura 48 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério

da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 257,30V$.

Na Figura 48a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 30^\circ$ e $\delta = 0^\circ$.

Na Figura 48b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 30^\circ$ e $\delta = 0^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 30^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com um analisador de qualidade de energia e o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 22,85^\circ$.

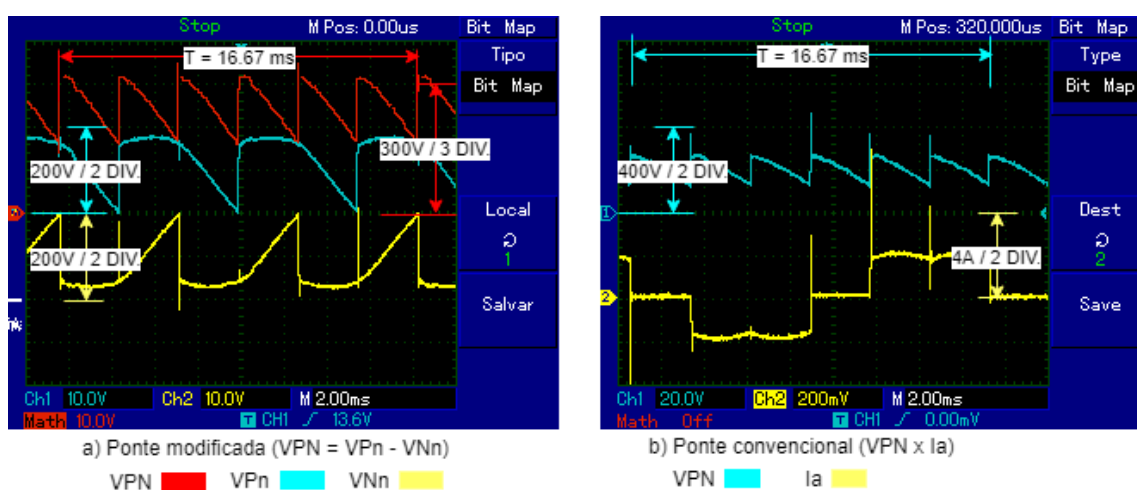


Figura 48: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 30^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

5.2.5 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 30^\circ$; $\delta = 30^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 30^\circ$)

Na Figura 49 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 30^\circ$ e $\delta = 30^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 257,30V$. Na Figura 49a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A (VPN x

la); na Figura 49b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro ($VPN \times I_N$).

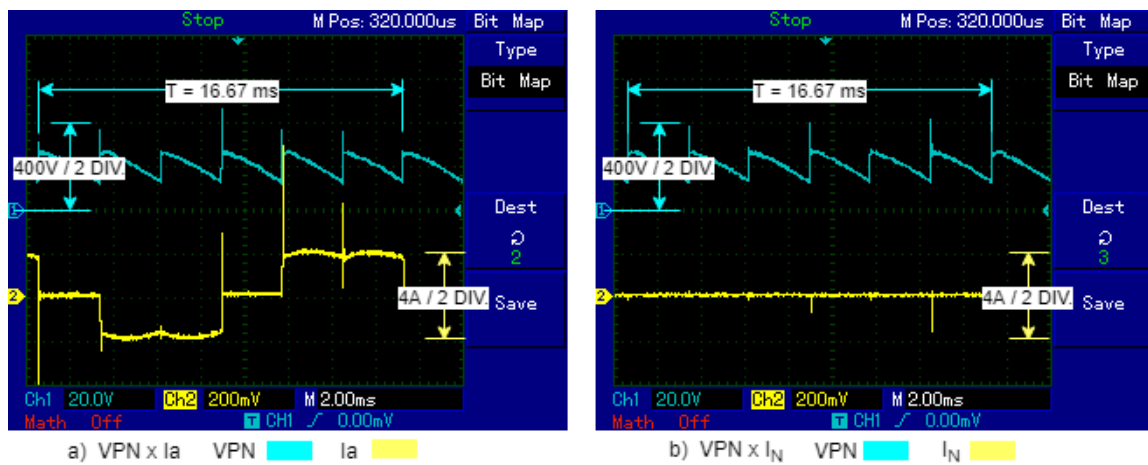


Figura 49: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 30^\circ$; $\delta = 30^\circ$)

Na Figura 50 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 257,30V$.

Na Figura 50a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 30^\circ$ e $\delta = 30^\circ$.

Na Figura 50b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (Ia), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 30^\circ$ e $\delta = 30^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 30^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com um analisador de qualidade de energia e o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 22,85^\circ$.

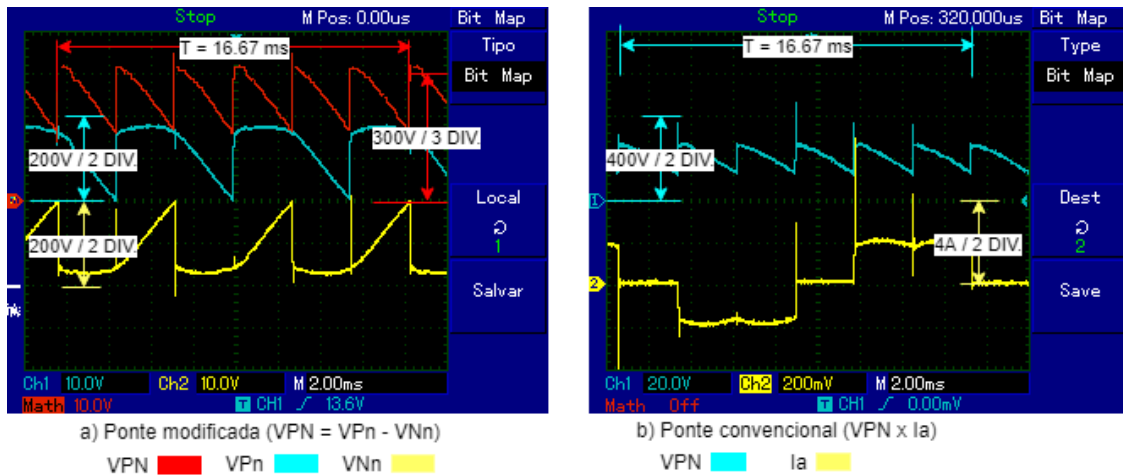


Figura 50: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 30^\circ$; $\delta = 30^\circ$)

5.2.6 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 45^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 43,38^\circ$)

Na Figura 51 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 45^\circ$ e $\delta = 0^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 215,93V$. Na Figura 51a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A ($VPN \times I_a$); na Figura 51b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro ($VPN \times I_N$).

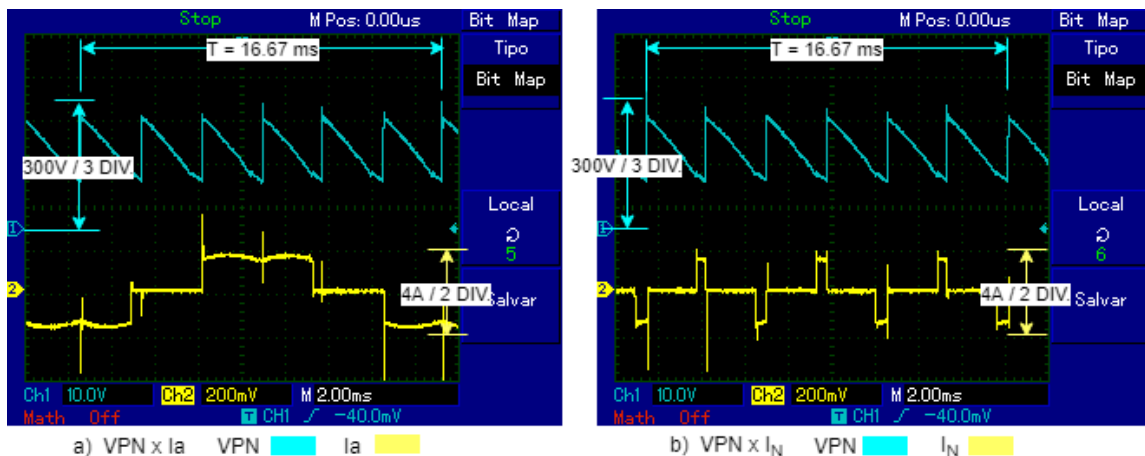


Figura 51: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 45^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

Na Figura 52 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério

da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 215,93V$.

Na Figura 52a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 45^\circ$ e $\delta = 0^\circ$.

Na Figura 52b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 45^\circ$ e $\delta = 0^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 43,38^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com dois analisadores de qualidade de energia diferentes; no primeiro analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 36,26^\circ$ e no segundo analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional foi $\alpha = 40,79^\circ$.

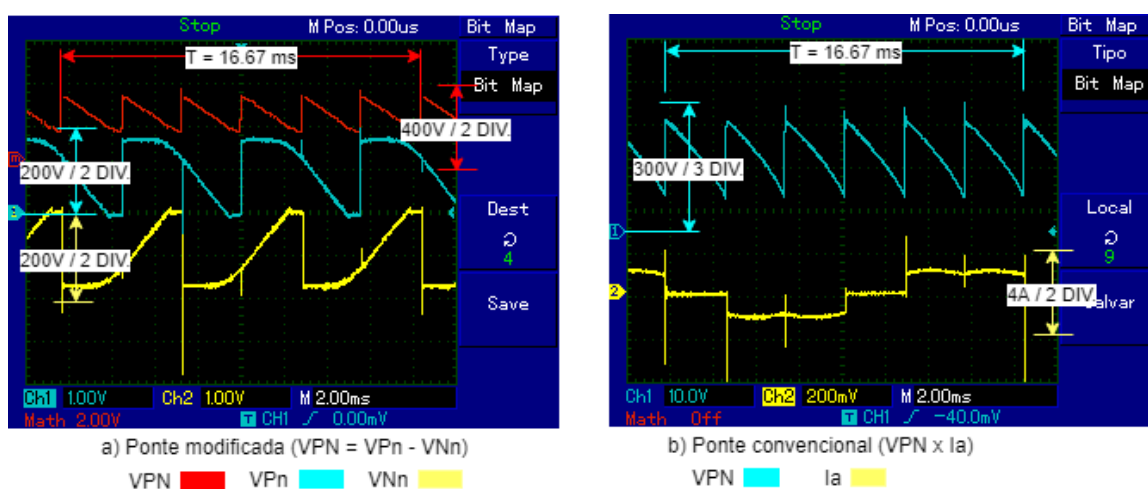


Figura 52: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 45^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

5.2.7 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 60^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 54,74^\circ$)

Na Figura 53 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e

ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 60^\circ$ e $\delta = 0^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 171,53V$. Na Figura 53a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A ($VPN \times I_a$); na Figura 53b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro ($VPN \times I_N$).

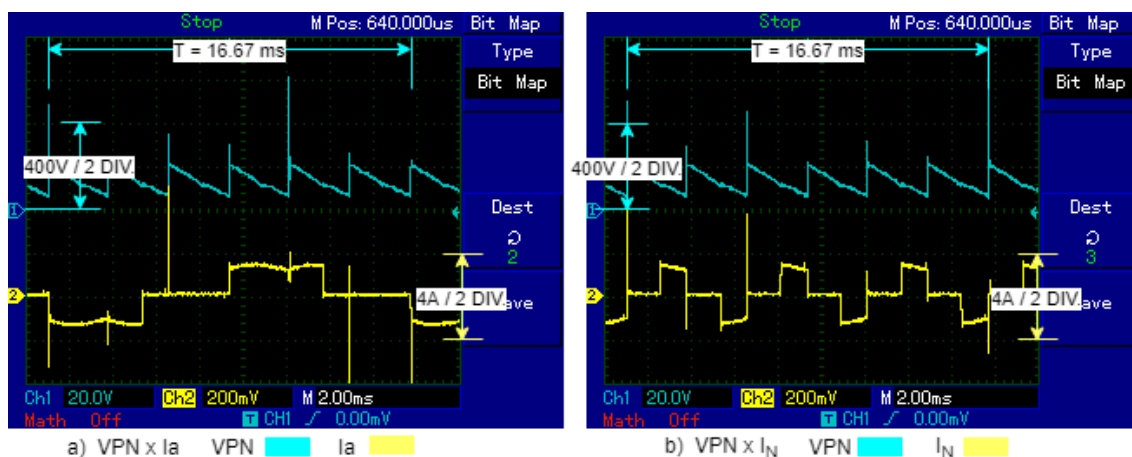


Figura 53: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 60^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

Na Figura 54 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 171,53V$.

Na Figura 54a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 60^\circ$ e $\delta = 0^\circ$.

Na Figura 54b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 60^\circ$ e $\delta = 0^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 54,74^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com dois analisadores de qualidade de energia diferentes; no primeiro analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido

foi $\alpha = 47,10^\circ$ e no segundo analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional foi $\alpha = 52,45^\circ$.

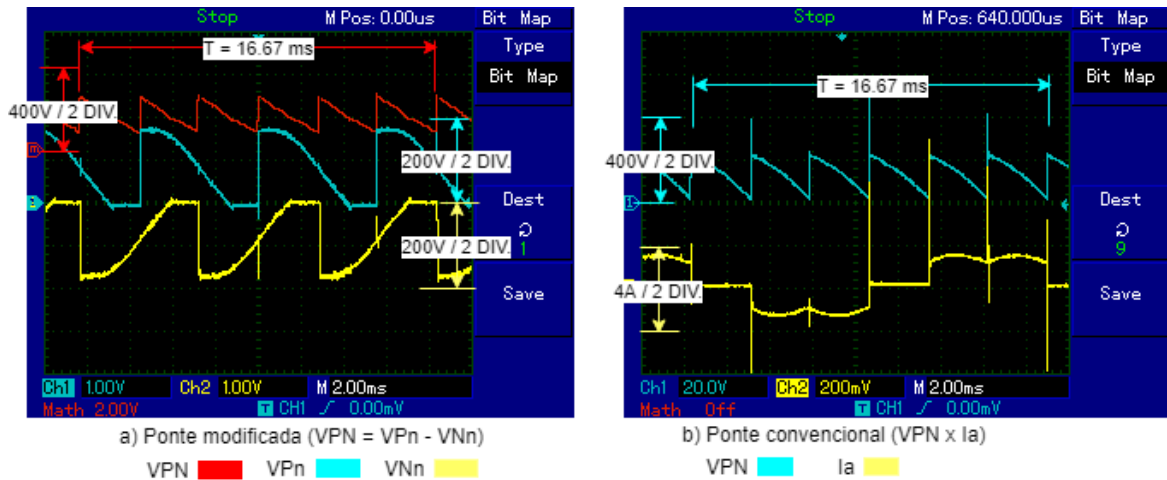


Figura 54: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 60^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

5.2.8 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 60^\circ$; $\delta = 30^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 60,00^\circ$)

Na Figura 55 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 60^\circ$ e $\delta = 30^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 148,55V$. Na Figura 55a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A ($VPN \times Ia$); na Figura 55b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro ($VPN \times I_N$).

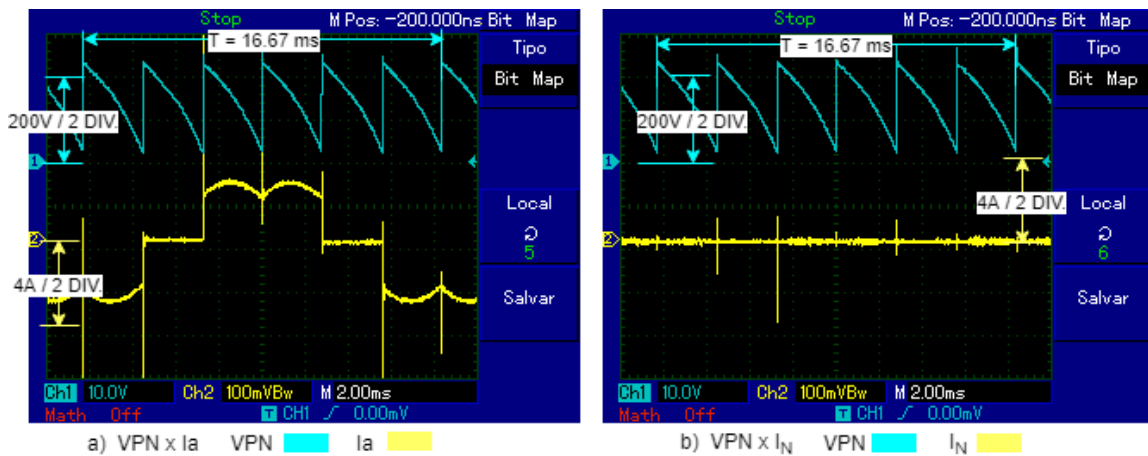


Figura 55: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 60^\circ$; $\delta = 30^\circ$)

Na Figura 56 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 148,55V$.

Na Figura 56a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 60^\circ$ e $\delta = 30^\circ$.

Na Figura 56b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 60^\circ$ e $\delta = 30^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 60,00^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com dois analisadores de qualidade de energia diferentes; no primeiro analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 51,84^\circ$ e no segundo analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional foi $\alpha = 58,50^\circ$.

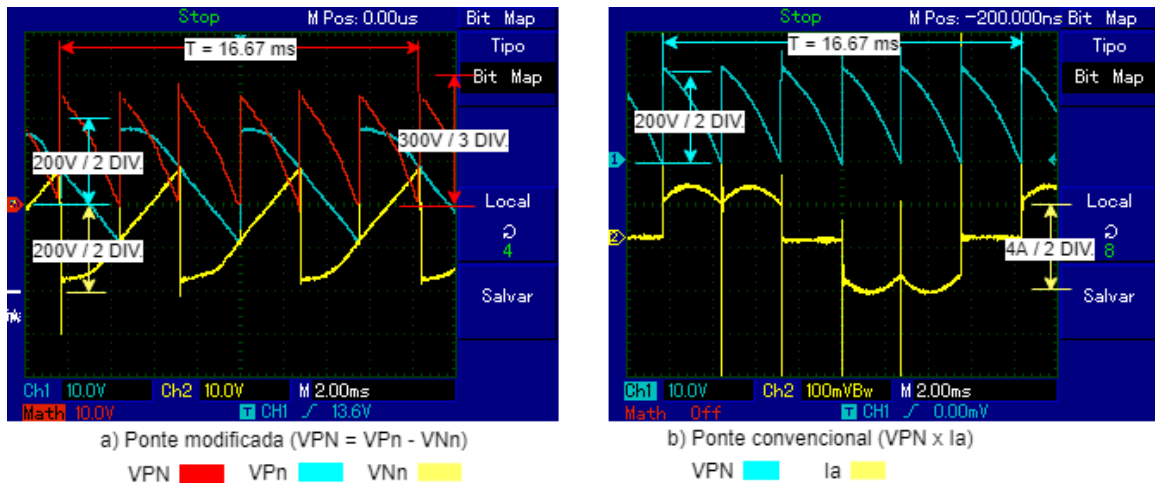


Figura 56: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 60^\circ$; $\delta = 30^\circ$)

5.2.9 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 70^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 61,50^\circ$)

Na Figura 57 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 70^\circ$ e $\delta = 0^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 141,75V$. Na Figura 57a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A ($VPN \times I_a$); na Figura 57b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro ($VPN \times I_N$).

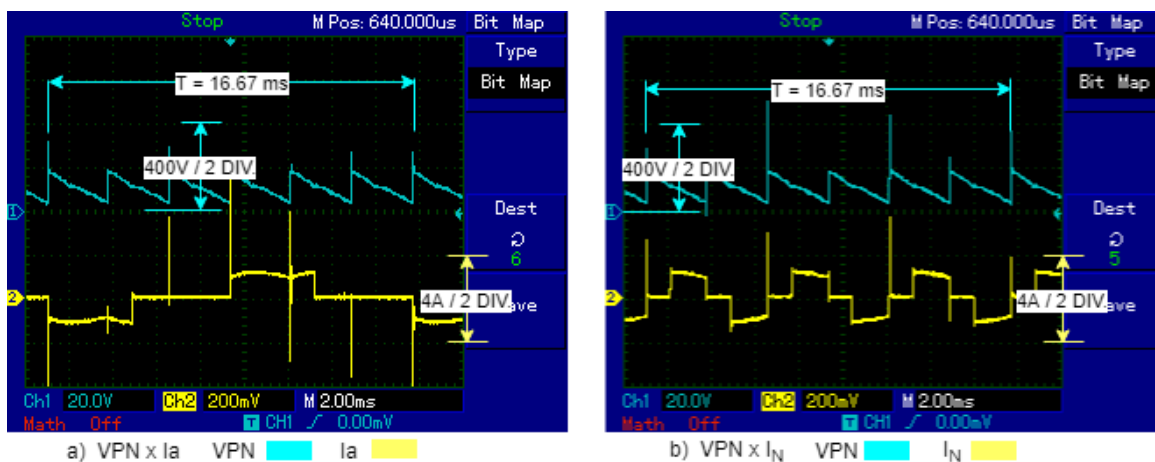


Figura 57: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 70^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

Na Figura 58 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério

da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 141,75V$.

Na Figura 58a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 70^\circ$ e $\delta = 0^\circ$.

Na Figura 58b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 70^\circ$ e $\delta = 0^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 61,50^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com um analisador de qualidade de energia; no analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 53,35^\circ$.

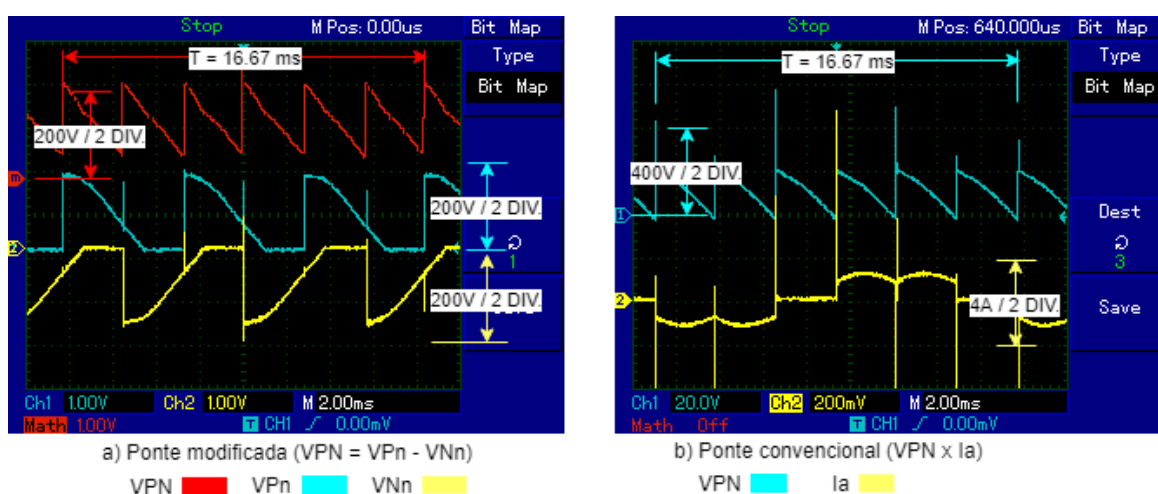


Figura 58: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 70^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

5.2.10 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 70^\circ$; $\delta = 30^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 66,44^\circ$)

Na Figura 59 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 70^\circ$ e $\delta = 30^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 118,77V$. Na Figura 59a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A ($VPN \times$

la); na Figura 59b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro ($VPN \times I_N$).

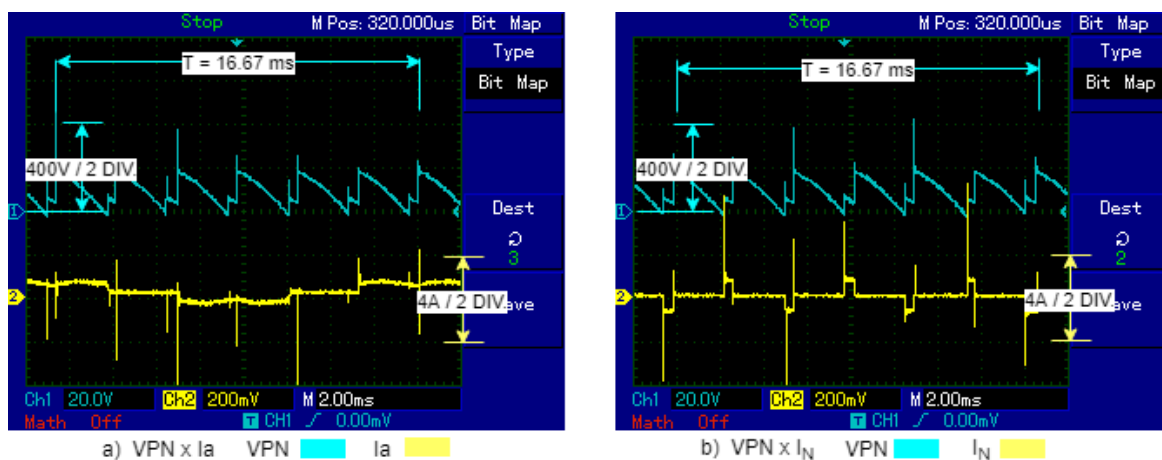


Figura 59: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 70^\circ$; $\delta = 30^\circ$)

Na Figura 60 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 118,77V$.

Na Figura 60a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 70^\circ$ e $\delta = 30^\circ$.

Na Figura 60b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 70^\circ$ e $\delta = 30^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 66,44^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com um analisador de qualidade de energia; no analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 57,01^\circ$.

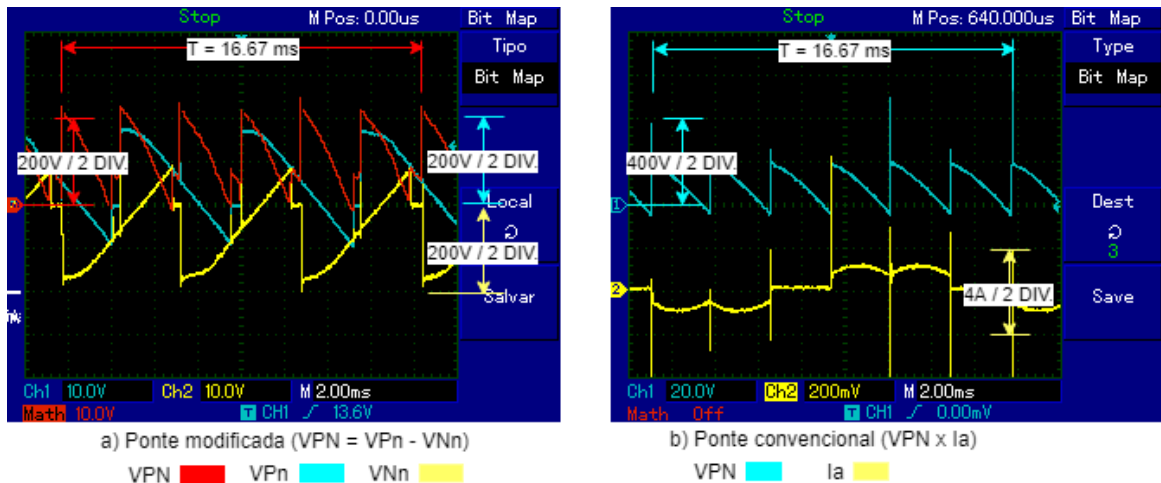


Figura 60: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 70^\circ$ e $\delta = 30^\circ$)

5.2.11 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 80^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 67,67^\circ$)

Na Figura 61 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 80^\circ$ e $\delta = 0^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 112,87V$. Na Figura 61a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A ($VPN \times I_a$); na Figura 61b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro ($VPN \times I_N$).

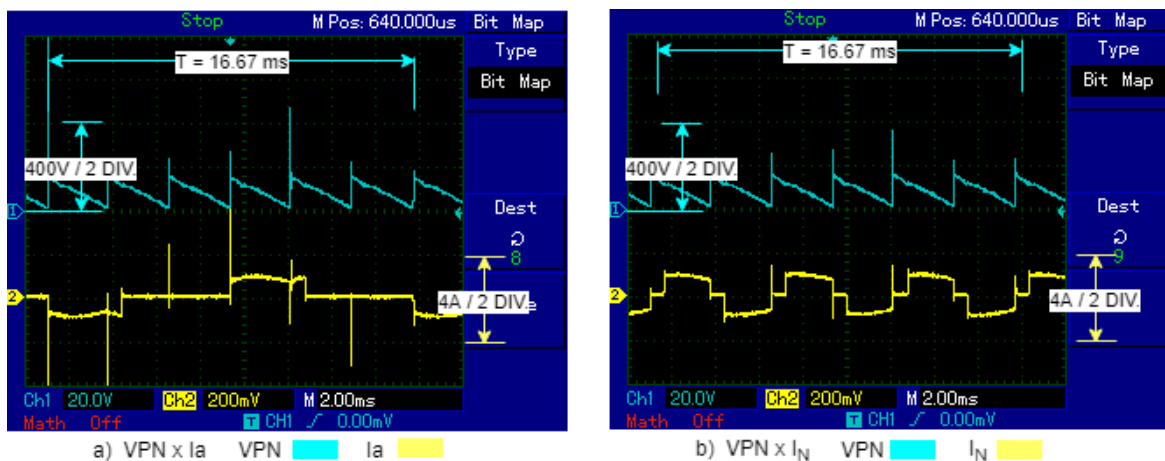


Figura 61: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 80^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

Na Figura 62 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério

da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 112,87V$.

Na Figura 62a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 80^\circ$ e $\delta = 0^\circ$.

Na Figura 62b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 80^\circ$ e $\delta = 0^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 67,67^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com um analisador de qualidade de energia; no analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 59,82^\circ$.

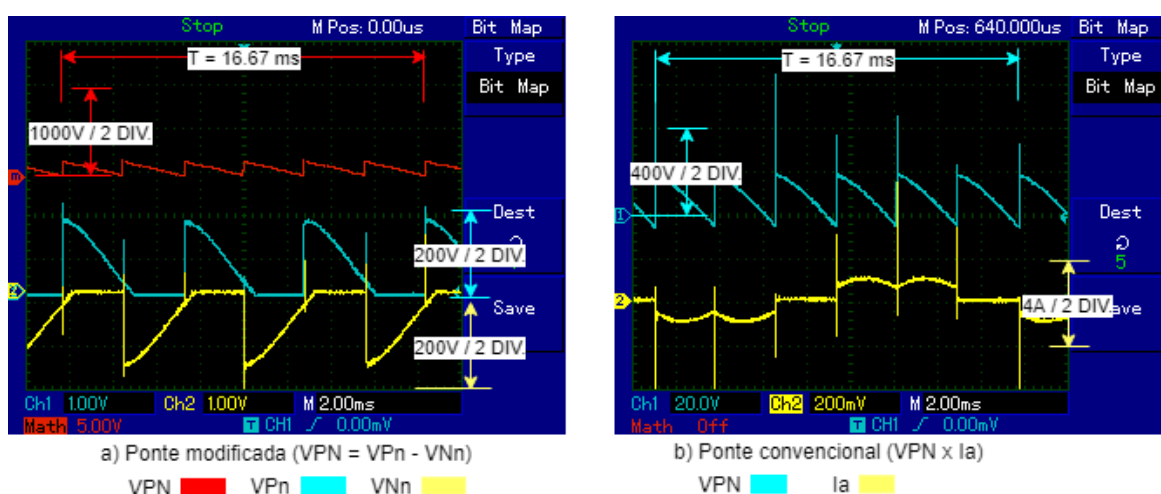


Figura 62: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 80^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

5.2.12 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 80^\circ$; $\delta = 30^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 72,39^\circ$)

Na Figura 63 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 80^\circ$ e $\delta = 30^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 89,88V$. Na Figura 63a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A ($VPN \times$

la); na Figura 63b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro ($VPN \times I_N$).

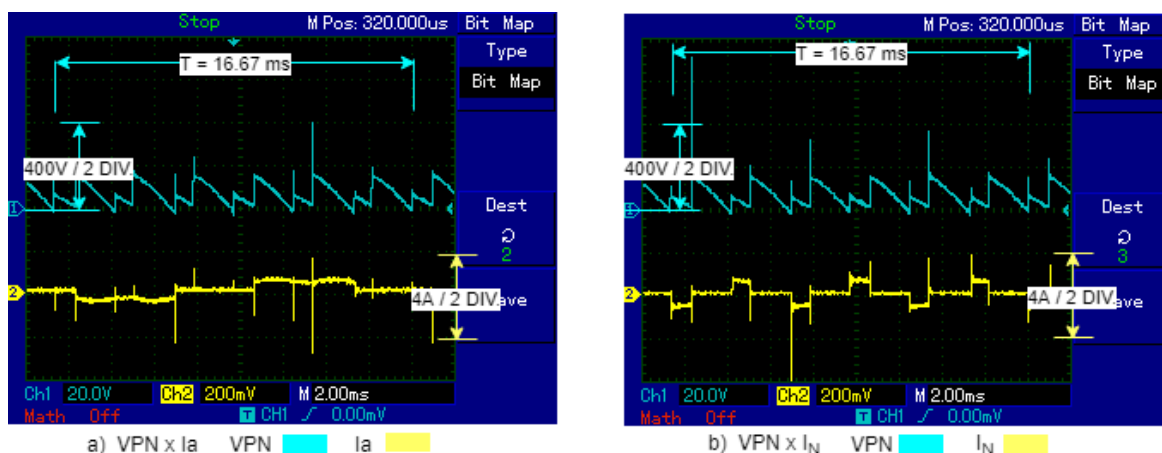


Figura 63: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 80^\circ$; $\delta = 30^\circ$)

Na Figura 64 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 89,88V$.

Na Figura 64a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 80^\circ$ e $\delta = 30^\circ$.

Na Figura 64b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 80^\circ$ e $\delta = 30^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 72,39^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com um analisador de qualidade de energia; no analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 62,56^\circ$.

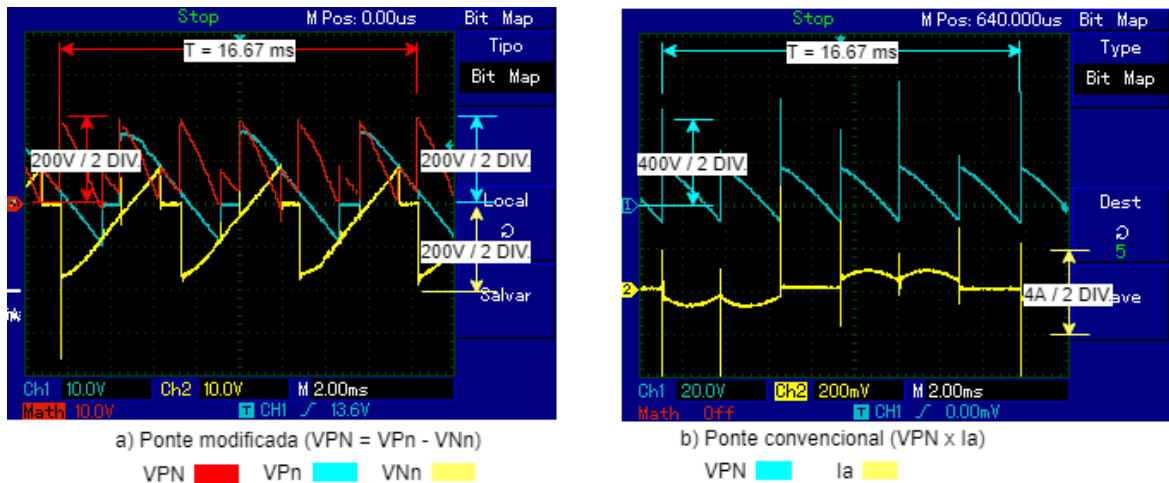


Figura 64: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 80^\circ$; $\delta = 30^\circ$)

5.2.13 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 90^\circ$; $\delta = 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 73,22^\circ$)

Na Figura 65 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 90^\circ$ e $\delta = 0^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 85,77V$. Na Figura 65a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A ($VPN \times Ia$); na Figura 65b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro ($VPN \times I_N$).

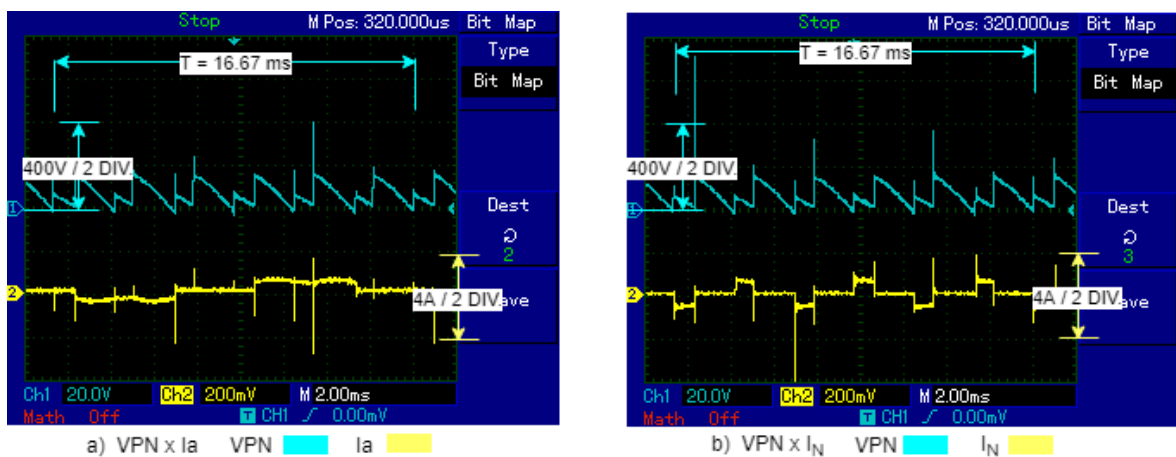


Figura 65: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 90^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

Na Figura 66 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério

da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 85,77V$.

Na Figura 66a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 90^\circ$ e $\delta = 0^\circ$.

Na Figura 66b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 90^\circ$ e $\delta = 0^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 73,22^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com um analisador de qualidade de energia; no analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 63,24^\circ$.

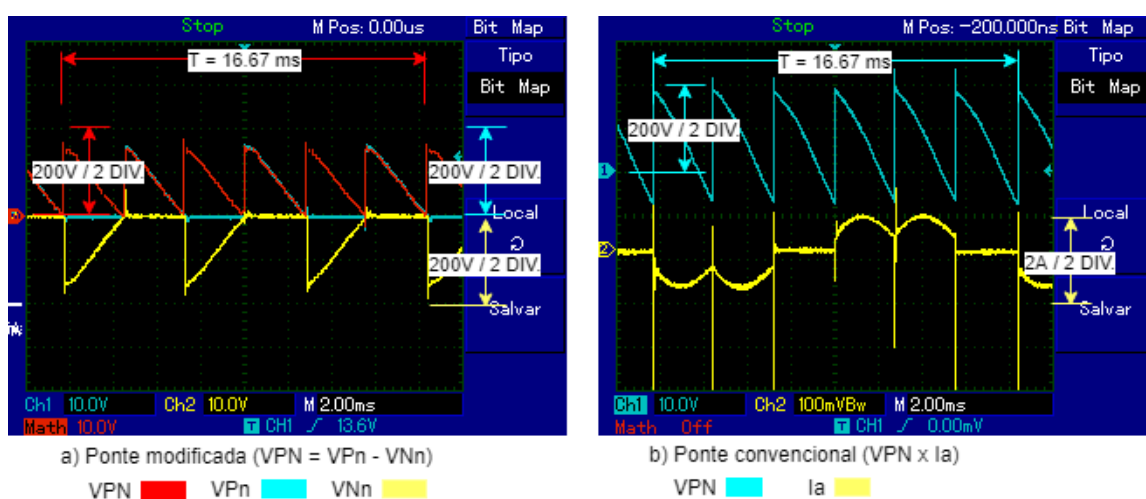


Figura 66: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 90^\circ$; $\delta = 0^\circ$)

5.2.14 Bancada de teste no modo de operação 1 ($\alpha = 90^\circ$; $\delta = 30^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha = 77,80^\circ$)

Na Figura 67 são mostradas as formas de onda de tensão de saída x corrente de entrada, para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 90^\circ$ e $\delta = 30^\circ$, com tensão média de saída $V_o = 62,79V$. Na Figura 67a é mostrada a tensão de saída e a corrente na fase A (VPN x

la); na Figura 67b são mostradas as formas de onda da tensão de saída e da corrente de neutro ($VPN \times I_N$).

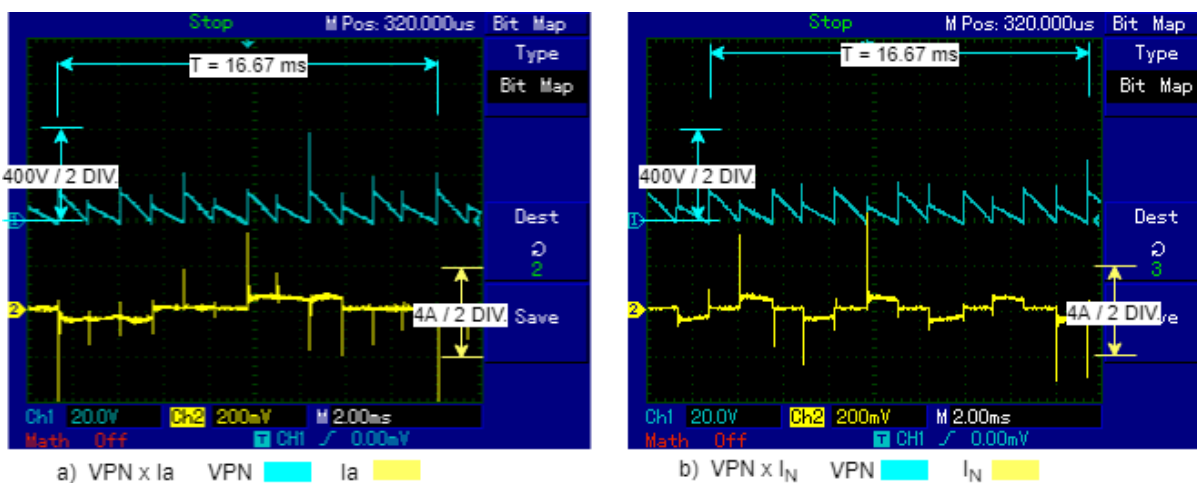


Figura 67: Ponte modificada controlada – tensão de saída x corrente de entrada ($\alpha = 90^\circ$; $\delta = 30^\circ$)

Na Figura 68 são mostradas as formas de onda da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, considerando o critério da mesma tensão média de saída nos dois modos de operação da bancada de teste, com tensão média de saída $V_o = 62,79V$.

Na Figura 68a são mostradas as formas de onda da tensão de saída (VPN), da tensão no tiristor de neutro T7 (VPn) e da tensão no tiristor de neutro T8 (VNn); as tensões supracitadas foram obtidas para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada ajustada para ângulos de disparo $\alpha = 90^\circ$ e $\delta = 30^\circ$.

Na Figura 68b são mostradas as formas de onda de tensão de saída (VPN) e de corrente de entrada (I_a), da bancada de teste operando como ponte convencional, de tal forma que sua tensão média de saída seja igual a tensão média de saída da bancada de teste configurada para operar como ponte modificada controlada com ângulos de disparo teóricos $\alpha = 90^\circ$ e $\delta = 30^\circ$. O ângulo de disparo teórico de ajuste da ponte convencional é $\alpha = 77,80^\circ$. No experimento, a ponte convencional foi ajustada até alcançar a mesma tensão média de saída da ponte modificada controlada, medida com um analisador de qualidade de energia; no analisador de qualidade de energia o ângulo de disparo equivalente da ponte convencional obtido foi $\alpha = 66,55^\circ$.

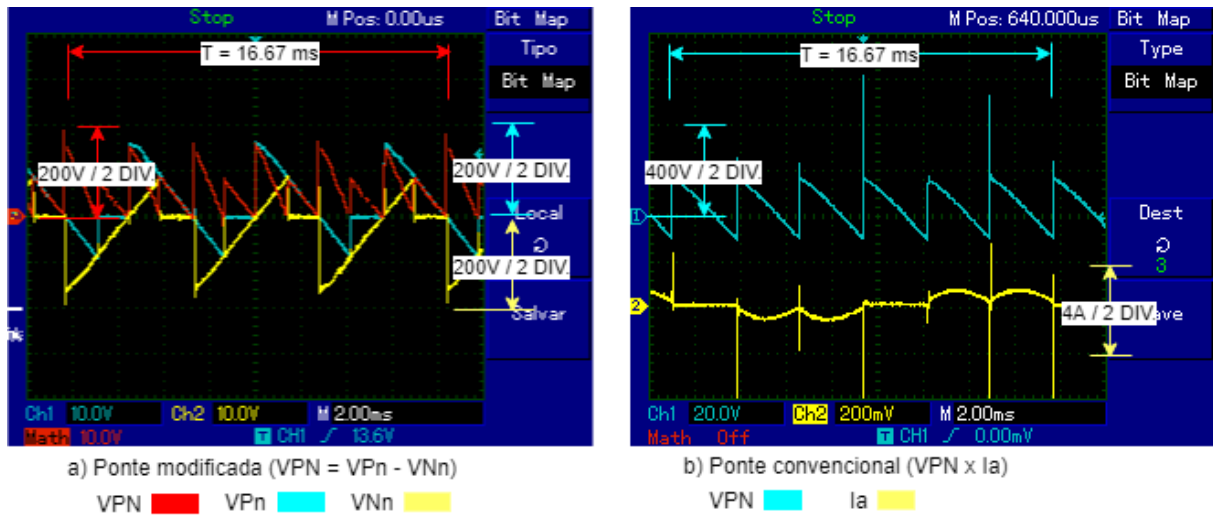


Figura 68: Tensão de saída (critério do mesmo valor médio - $\alpha = 90^\circ$; $\delta = 30^\circ$)

5.3 Fator de potência e fator de deslocamento da ponte modificada controlada e da ponte convencional

5.3.1 Geral

Nos itens 5.3.2 e 5.3.3 serão apresentados os valores medidos e teóricos de fator de potência (FP) e de fator de deslocamento (FD), para a bancada de testes funcionando no modo de operação 1 (ponte modificada controlada) e no modo de operação 2 (ponte convencional). Os resultados teóricos e experimentais foram obtidos, considerando dois intervalos distintos de ajustes dos ângulos de disparo da bancada de teste: a) bancada de teste funcionando no modo de operação 1 com $0 \leq \alpha \leq 30^\circ$ e seu equivalente ângulo de disparo α no modo de operação 2; b) bancada de teste funcionando no modo de operação 1 com $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e seu equivalente ângulo de disparo α no modo de operação 2.

5.3.2 Fator de potência e fator de deslocamento para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$

Na Tabela 2 estão agrupados os dados de fator de potência e de fator de deslocamento da ponte modificada controlada e da ponte convencional para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$; $\delta \geq 0^\circ$.

Tabela 2: Fator de potência e fator de deslocamento ($0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$)

Fator de potência e fator de deslocamento ($0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$)								
Vo (V)	Ponte modificada controlada					Ponte convencional		
	$\alpha (^{\circ})$	$\delta (^{\circ})$	FD	F_f	FP	$\alpha (^{\circ})$	FD	FP
297,10	0 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	1,000 ⁽¹⁾	0,960 ⁽¹⁾	0,960 ⁽¹⁾	0,00 ⁽¹⁾	1,000 ⁽¹⁾	0,960 ⁽¹⁾
297,10	0 ⁽²⁾	0 ⁽²⁾	0,998 ⁽²⁾	0,953 ⁽²⁾	0,955 ⁽²⁾	0,00 ⁽²⁾	0,997 ⁽²⁾	0,955 ⁽²⁾
297,10 ⁽⁴⁾	0 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	1,000 ⁽³⁾	0,955 ⁽³⁾	0,955 ⁽³⁾	0,00 ⁽³⁾	1,000 ⁽³⁾	0,955 ⁽³⁾
297,10	0 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾	1,000 ⁽¹⁾	0,960 ⁽¹⁾	0,960 ⁽¹⁾	0,00 ⁽¹⁾	1,000 ⁽¹⁾	0,960 ⁽¹⁾
297,10	0 ⁽²⁾	30 ⁽²⁾	0,998 ⁽²⁾	0,953 ⁽²⁾	0,955 ⁽²⁾	0,00 ⁽²⁾	0,997 ⁽²⁾	0,955 ⁽²⁾
297,10 ⁽⁴⁾	0 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾	1,000 ⁽³⁾	0,955 ⁽³⁾	0,955 ⁽³⁾	0,00 ⁽³⁾	1,000 ⁽³⁾	0,955 ⁽³⁾
257,30	30 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	0,923 ⁽¹⁾	0,953 ⁽¹⁾	0,880 ⁽¹⁾	22,85 ⁽¹⁾	0,923 ⁽¹⁾	0,880 ⁽¹⁾
257,30 ⁽⁴⁾	30 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	0,866 ⁽³⁾	0,955 ⁽³⁾	0,827 ⁽³⁾	30,00 ⁽³⁾	0,866 ⁽³⁾	0,827 ⁽³⁾
257,30	30 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾	0,923 ⁽¹⁾	0,953 ⁽¹⁾	0,880 ⁽¹⁾	22,85 ⁽¹⁾	0,923 ⁽¹⁾	0,880 ⁽¹⁾
257,30 ⁽⁴⁾	30 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾	0,866 ⁽³⁾	0,955 ⁽³⁾	0,827 ⁽³⁾	30,00 ⁽³⁾	0,866 ⁽³⁾	0,827 ⁽³⁾

Notas:
⁽¹⁾ resultado experimental com analisador de qualidade de energia 1 (AQE1);
⁽²⁾ resultado experimental com analisador de qualidade de energia 2 (AQE2);
⁽³⁾ resultado teórico obtido por equações [2, 18, 21, 25];
⁽⁴⁾ critério da mesma tensão média de saída CC para a ponte modificada controlada e para a ponte convencional, obtida considerando a equação (18) igual a equação (40).

5.3.3 Fator de potência e fator de deslocamento para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$

Na Tabela 3 estão agrupados os dados de fator de potência e de fator de deslocamento da ponte modificada controlada e da ponte convencional. O experimento foi previsto para ajustes de ângulo de disparo principal α até 150° e os testes foram realizados para α até 90° , pois durante os testes, à medida que o ângulo de disparo α se aproximava de 90° , ocorriam intermitências na corrente contínua de saída da bancada de teste e saturação.

Tabela 3: Fator de potência e fator de deslocamento ($30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$)

Fator de potência e fator de deslocamento ($30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$)								
Vo (V)	Ponte modificada controlada					Ponte convencional		
	$\alpha (^{\circ})$	$\delta (^{\circ})$	FD	F_f	FP	$\alpha (^{\circ})$	FD	FP
215,93	45 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	0,853 ⁽¹⁾	0,926 ⁽¹⁾	0,790 ⁽¹⁾	36,26 ⁽¹⁾	0,813 ⁽¹⁾	0,770 ⁽¹⁾
215,93	45 ⁽²⁾	0 ⁽²⁾	0,789 ⁽²⁾	0,938 ⁽²⁾	0,740 ⁽²⁾	40,79 ⁽²⁾	0,759 ⁽²⁾	0,723 ⁽²⁾
215,93 ⁽⁴⁾	45 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	0,793 ⁽³⁾	0,935 ⁽³⁾	0,742 ⁽³⁾	43,38 ⁽³⁾	0,727 ⁽³⁾	0,694 ⁽³⁾

Fator de potência e fator de deslocamento ($30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$)								
Vo (V)	Ponte modificada controlada					Ponte convencional		
	$\alpha (^{\circ})$	$\delta (^{\circ})$	FD	F_f	FP	$\alpha (^{\circ})$	FD	FP
171,53	60 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	0,780 ⁽¹⁾	0,897 ⁽¹⁾	0,700 ⁽¹⁾	47,10 ⁽¹⁾	0,687 ⁽¹⁾	0,650 ⁽¹⁾
171,53	60 ⁽²⁾	0 ⁽²⁾	0,697 ⁽²⁾	0,901 ⁽²⁾	0,628 ⁽²⁾	52,45 ⁽²⁾	0,616 ⁽²⁾	0,582 ⁽²⁾
171,53 ⁽⁴⁾	60 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	0,707 ⁽³⁾	0,900 ⁽³⁾	0,637 ⁽³⁾	54,74 ⁽³⁾	0,577 ⁽³⁾	0,551 ⁽³⁾
148,55	60 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾	0,617 ⁽¹⁾	0,957 ⁽¹⁾	0,590 ⁽¹⁾	51,84 ⁽¹⁾	0,617 ⁽¹⁾	0,590 ⁽¹⁾
148,55	60 ⁽²⁾	30 ⁽²⁾	0,511 ⁽²⁾	0,959 ⁽²⁾	0,490 ⁽²⁾	58,50 ⁽²⁾	0,517 ⁽²⁾	0,490 ⁽²⁾
148,55 ⁽⁴⁾	60 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾	0,500 ⁽³⁾	0,955 ⁽³⁾	0,477 ⁽³⁾	60,00 ⁽³⁾	0,500 ⁽³⁾	0,477 ⁽³⁾
141,75	70 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	0,730 ⁽¹⁾	0,877 ⁽¹⁾	0,640 ⁽¹⁾	53,35 ⁽¹⁾	0,603 ⁽¹⁾	0,570 ⁽¹⁾
141,75 ⁽⁴⁾	70 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	0,643 ⁽³⁾	0,868 ⁽³⁾	0,558 ⁽³⁾	61,50 ⁽³⁾	0,477 ⁽³⁾	0,456 ⁽³⁾
118,77	70 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾	0,550 ⁽¹⁾	0,945 ⁽¹⁾	0,520 ⁽¹⁾	57,01 ⁽¹⁾	0,540 ⁽¹⁾	0,520 ⁽¹⁾
118,77 ⁽⁴⁾	70 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾	0,423 ⁽³⁾	0,943 ⁽³⁾	0,399 ⁽³⁾	66,44 ⁽³⁾	0,400 ⁽³⁾	0,382 ⁽³⁾
112,87	80 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	0,683 ⁽¹⁾	0,834 ⁽¹⁾	0,570 ⁽¹⁾	59,82 ⁽¹⁾	0,527 ⁽¹⁾	0,480 ⁽¹⁾
112,87 ⁽⁴⁾	80 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	0,574 ⁽³⁾	0,828 ⁽³⁾	0,475 ⁽³⁾	67,67 ⁽³⁾	0,380 ⁽³⁾	0,363 ⁽³⁾
89,88	80 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾	0,480 ⁽¹⁾	0,917 ⁽¹⁾	0,440 ⁽¹⁾	62,56 ⁽¹⁾	0,460 ⁽¹⁾	0,440 ⁽¹⁾
89,88 ⁽⁴⁾	80 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾	0,342 ⁽³⁾	0,925 ⁽³⁾	0,316 ⁽³⁾	72,39 ⁽³⁾	0,303 ⁽³⁾	0,289 ⁽³⁾
85,77	90 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	0,637 ⁽¹⁾	0,785 ⁽¹⁾	0,500 ⁽¹⁾	63,24 ⁽¹⁾	0,457 ⁽¹⁾	0,430 ⁽¹⁾
85,77 ⁽⁴⁾	90 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	0,500 ⁽³⁾	0,780 ⁽³⁾	0,390 ⁽³⁾	73,22 ⁽³⁾	0,289 ⁽³⁾	0,276 ⁽³⁾
62,79	90 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾	0,437 ⁽¹⁾	0,870 ⁽¹⁾	0,380 ⁽¹⁾	66,55 ⁽¹⁾	0,460 ⁽¹⁾	0,380 ⁽¹⁾
62,79 ⁽⁴⁾	90 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾	0,259 ⁽³⁾	0,900 ⁽³⁾	0,233 ⁽³⁾	77,80 ⁽³⁾	0,211 ⁽³⁾	0,202 ⁽³⁾

Notas:
⁽¹⁾ resultado experimental com analisador de qualidade de energia 1;
⁽²⁾ resultado experimental com analisador de qualidade de energia 2;
⁽³⁾ resultado teórico obtido por equações [2, 18, 21, 25];
⁽⁴⁾ critério da mesma tensão média de saída CC para a ponte modificada controlada e para a ponte convencional, obtida considerando a equação (18) igual a equação (40).

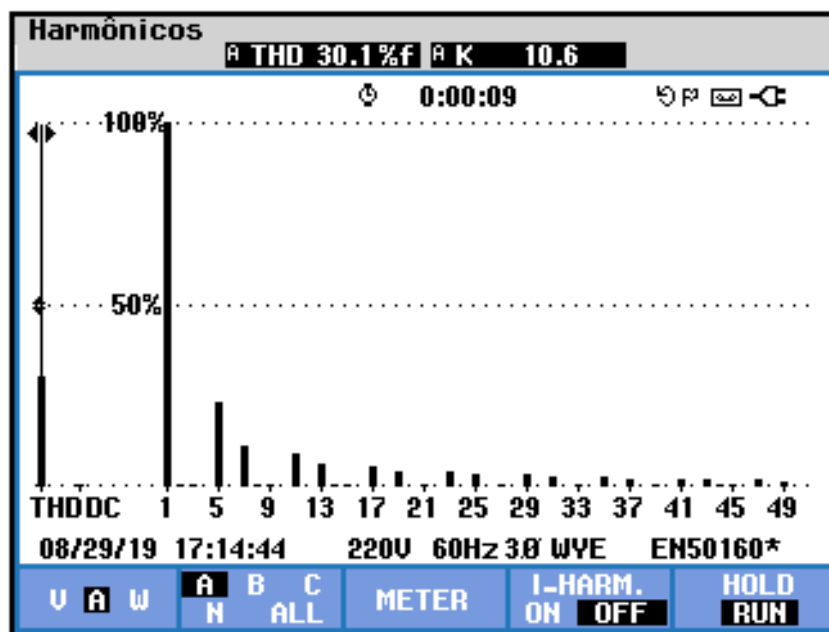
5.4 Distorção harmônica total da ponte modificada controlada e da ponte convencional

5.4.1 Geral

Durante os ensaios da bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, foram coletados os dados percentuais de distorção harmônica de corrente individual e total para a bancada de teste operando em dois intervalos específicos de ângulos de disparo dos tiristores de fase e neutro: $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$; $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$.

5.4.2 Distorção harmônica total para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$

Na Figura 69 são mostrados os espectros harmônicos de corrente individual e dos espectros harmônicos de corrente total, registrados no analisador de qualidade de energia, da bancada de teste operando como ponte modificada controlada para $\alpha = 30^\circ$ e $\delta = 30^\circ$ e como ponte convencional com ângulo de disparo α tal que a tensão média na saída da ponte convencional seja a mesma da ponte modificada controlada ($\alpha = 30^\circ$). Para o intervalo $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$ o espectro harmônico é idêntico para a bancada de teste operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional.



Ponte modificada (30° ; 30°) / Ponte convencional (30°)

Figura 69: Espectro harmônico de corrente total/individual ($\alpha = 30^\circ$ e $\delta = 30^\circ$; $\alpha = 30^\circ$)

Na Tabela 4 são mostrados os valores de distorção harmônica total de corrente obtidos experimentalmente e seus respectivos valores teóricos, para bancada de teste configurada no modo de operação 1 (ponte modificada controlada) e no modo de operação 2 (ponte convencional), considerando o critério da mesma tensão média de saída, obtidos para $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$.

Tabela 4: Distorção harmônica total de corrente ($0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$)

Distorção harmônica total de corrente ($0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$)					
V_o (V)	Ponte modificada controlada			Ponte convencional	
	α ($^{\circ}$)	δ ($^{\circ}$)	DHT	α ($^{\circ}$)	DHT
297,10	$0^{(1)}$	$0^{(1)}$	29,9 ⁽¹⁾	$0,00^{(1)}$	29,9 ⁽¹⁾
297,10	$0^{(2)}$	$0^{(2)}$	30,0 ⁽²⁾	$0,00^{(2)}$	30,0 ⁽²⁾
297,10 ⁽⁴⁾	$0^{(3)}$	$0^{(3)}$	31,1 ⁽³⁾	$0,00^{(3)}$	31,1 ⁽³⁾
297,10	$0^{(1)}$	$30^{(1)}$	29,9 ⁽¹⁾	$0,00^{(1)}$	29,9 ⁽¹⁾
297,10	$0^{(2)}$	$30^{(2)}$	30,0 ⁽²⁾	$0,00^{(2)}$	30,0 ⁽²⁾
297,10 ⁽⁴⁾	$0^{(3)}$	$30^{(3)}$	31,1 ⁽³⁾	$0,00^{(3)}$	31,1 ⁽³⁾
257,30	$30^{(1)}$	$0^{(1)}$	30,1 ⁽¹⁾	22,85 ⁽¹⁾	30,1 ⁽¹⁾
257,30 ⁽⁴⁾	$30^{(3)}$	$0^{(3)}$	31,1 ⁽³⁾	30,00 ⁽³⁾	31,1 ⁽³⁾
257,30	$30^{(1)}$	$30^{(1)}$	30,1 ⁽¹⁾	22,85 ⁽¹⁾	30,1 ⁽¹⁾
257,30 ⁽⁴⁾	$30^{(3)}$	$30^{(3)}$	31,1 ⁽³⁾	30,00 ⁽³⁾	31,1 ⁽³⁾

Notas:
⁽¹⁾ resultado experimental com analisador de qualidade de energia 1;
⁽²⁾ resultado experimental com analisador de qualidade de energia 2;
⁽³⁾ resultado teórico obtido por equações [2, 18, 21, 25];
⁽⁴⁾ critério da mesma tensão média de saída CC para a ponte modificada controlada e para a ponte convencional, obtida considerando a equação (18) igual a equação (40).

5.4.3 Distorção harmônica total para $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$

Na Figura 70 são mostrados os espectros harmônicos de corrente individual e total, registrados no analisador de qualidade de energia, da bancada de teste operando como ponte modificada controlada para $\alpha = 70^{\circ}$ e $\delta = 30^{\circ}$ e como ponte convencional com ângulo de disparo α tal que a tensão média na saída da ponte convencional seja a mesma da ponte modificada controlada ($\alpha = 57,01^{\circ}$).

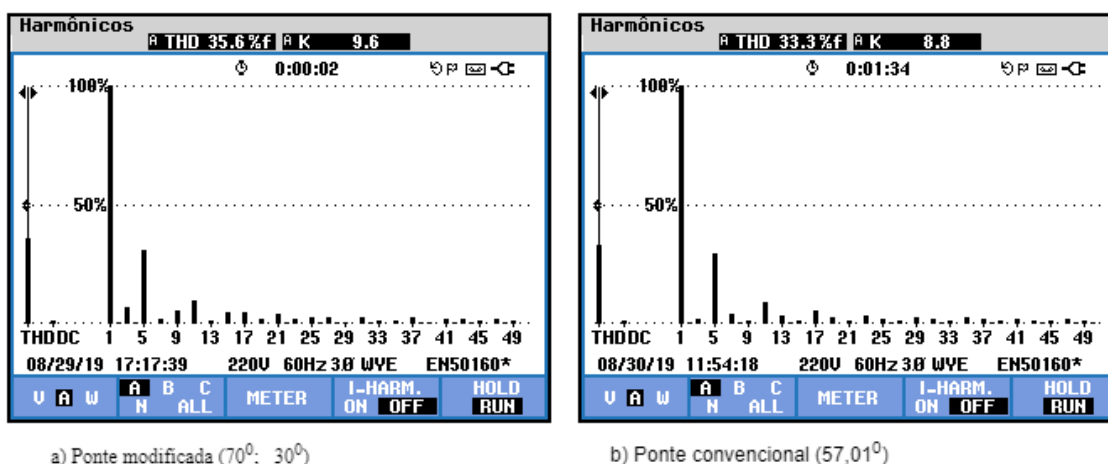


Figura 70: Espectro harmônico de corrente total/individual ($\alpha = 70^\circ$ e $\delta = 30^\circ$; $\alpha = 57,01^\circ$)

Na Tabela 5 são mostrados os valores de distorção harmônica total de corrente obtidos experimentalmente e seus respectivos valores teóricos, para bancada de teste configurada no modo de operação 1 (ponte modificada controlada) e no modo de operação 2 (ponte convencional), considerando o critério da mesma tensão média de saída, obtidos para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$. Pretendia-se realizar o experimento para ajustes de ângulo de disparo principal α até 150° e os testes foram realizados para α até 90° , pois durante os testes, à medida que o ângulo de disparo α se aproximava de 90° , ocorriam intermitências na corrente contínua de saída da bancada de teste e saturação.

Tabela 5: Distorção harmônica total de corrente ($30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$)

Distorção harmônica total de corrente ($30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$)					
Vo ⁽⁴⁾	Ponte modificada controlada			Ponte convencional	
	α (°)	δ (°)	DHT	α (°)	DHT
	45 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	35,4 ⁽¹⁾	36,26 ⁽¹⁾	30,2 ⁽¹⁾
	45 ⁽²⁾	0 ⁽²⁾	37,0 ⁽²⁾	40,79 ⁽²⁾	31,9 ⁽²⁾
215,93 ⁽⁴⁾	45 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	37,9 ⁽³⁾	43,38 ⁽³⁾	31,1 ⁽³⁾
	60 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	45,9 ⁽¹⁾	47,10 ⁽¹⁾	31,2 ⁽¹⁾
	60 ⁽²⁾	0 ⁽²⁾	48,1 ⁽²⁾	52,45 ⁽²⁾	34,7 ⁽²⁾
	60 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	48,3 ⁽³⁾	54,74 ⁽³⁾	31,1 ⁽³⁾
171,53 ⁽⁴⁾	60 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾	31,6 ⁽¹⁾	51,84 ⁽¹⁾	31,3 ⁽¹⁾
	60 ⁽²⁾	30 ⁽²⁾	29,6 ⁽²⁾	58,50 ⁽²⁾	27,1 ⁽²⁾
148,55 ⁽⁴⁾	60 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾	31,1 ⁽³⁾	60,00 ⁽³⁾	31,1 ⁽³⁾
	70 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	54,0 ⁽¹⁾	53,35 ⁽¹⁾	32,0 ⁽¹⁾

Distorção harmônica total de corrente ($30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$)					
Vo ⁽⁴⁾	Ponte modificada controlada			Ponte convencional	
	α (°)	δ (°)	DHT	α (°)	DHT
141,75 ⁽⁴⁾	70 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	57,2 ⁽³⁾	61,50 ⁽³⁾	31,1 ⁽³⁾
	70 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾	35,6 ⁽¹⁾	57,01 ⁽¹⁾	33,3 ⁽¹⁾
118,77 ⁽⁴⁾	70 ⁽³⁾	30	35,2	66,44	31,1
	80 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	63,7 ⁽¹⁾	59,82 ⁽¹⁾	33,7 ⁽¹⁾
112,87 ⁽⁴⁾	80 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	67,7 ⁽³⁾	67,67 ⁽³⁾	31,1 ⁽³⁾
	80 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾	43,4 ⁽¹⁾	62,56 ⁽¹⁾	36,0 ⁽¹⁾
89,88 ⁽⁴⁾	80 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾	41,1 ⁽³⁾	72,39 ⁽³⁾	31,1 ⁽³⁾
	90 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	71,9 ⁽¹⁾	63,24 ⁽¹⁾	36,5 ⁽¹⁾
85,77	90 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	80,3 ⁽³⁾	73,22 ⁽³⁾	31,1 ⁽³⁾
	90 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾	53,3 ⁽¹⁾	66,55 ⁽¹⁾	42,8 ⁽¹⁾
62,79	90 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾	48,3 ⁽³⁾	77,80 ⁽³⁾	31,1 ⁽³⁾

Notas:

(1) resultado experimental com analisador de qualidade de energia 1;

(2) resultado experimental com analisador de qualidade de energia 2;

(3) resultado teórico obtido por equações [2, 18, 21, 25];

(4) critério da mesma tensão média de saída CC para a ponte modificada controlada e para a ponte convencional, obtida considerando a equação (18) igual a equação (40).

6 RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

6.1 Bancada de teste no modo de operação 1 ($0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$) e no modo de operação 2 ($\alpha \geq 0^{\circ}$)

Nesta seção serão comparados os resultados teóricos e experimentais, considerando a bancada de teste trabalhando no modo de operação 1 (ponte modificada controlada) para $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$, frente aos resultados da bancada de teste, trabalhando no modo de operação 2 (ponte convencional) para o seu equivalente ângulo de disparo auxiliar α ajustado pelo critério da mesma tensão média de saída na bancada de teste. Nesta seção serão comparados os resultados apresentados na Tabela 2, na Tabela 4 e nos gráficos considerando os ângulos de disparo supracitados. Sendo assim, observa-se que:

- O fator de forma da ponte modificada controlada e da ponte convencional são iguais.
- O fator de potência da ponte modificada controlada e da ponte convencional são iguais.
- A forma de onda da corrente de entrada de fase da ponte modificada controlada e da ponte convencional são iguais e do tipo retangulares.
- A ponte convencional não possui corrente de neutro, uma vez que o tiristores de neutro T7 e T8 se encontram inoperantes, pois nesta condição de operação da bancada de teste, o circuito de controle de disparo auxiliar está desenergizado.
- A ponte modificada controlada não possui corrente de neutro, uma vez que os tiristores de neutro T7 e T8 estão inoperantes pois os tiristores de neutro não estão diretamente polarizados, embora nesta condição de operação da bancada de teste, o circuito de controle de disparo auxiliar esteja em funcionamento.
- Quaisquer que sejam os ajustes do ângulo de disparo auxiliar δ , os tiristores de neutro T7 e T8 permanecem inoperantes.
- A forma de onda da tensão de saída é dependente de quais tiristores estão operantes. Como somente os tiristores de fase estão em operação, logo a

forma de onda da tensão de saída é composta apenas pelas parcelas de tensão de entrada fase-fase dos tiristores de fase.

- A forma de onda de tensão de saída da ponte modificada controlada é igual a forma de onda da ponte convencional e composta de quatro parcelas das formas de onda de tensão de entrada fase-fase, sendo que: para o semi-ciclo positivo da corrente de entrada de cada fase tem-se duas parcelas de tensão fase-fase de entrada ($V_{ab} + V_{ac}$ ou $V_{bc} + V_{ba}$ ou $V_{ca} + V_{cb}$); para o semi-ciclo negativo da corrente de entrada de cada fase tem-se duas parcelas de tensão fase-fase de entrada ($-V_{ab} + -V_{ac}$ ou $-V_{bc} + -V_{ba}$ ou $-V_{ca} + -V_{cb}$).

6.2 Bancada de teste no modo de operação 1 ($30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$) e no modo de operação 2 ($\alpha > 0^\circ$)

Nesta seção serão comparados os resultados teóricos e experimentais, considerando a bancada de teste trabalhando no modo de operação 1 (ponte modificada controlada) para $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ e $\delta \geq 0^\circ$, frente aos resultados da bancada de teste, trabalhando no modo de operação 2 (ponte convencional) para o seu equivalente ângulo de disparo auxiliar α que é ajustado pelo critério da mesma tensão média de saída na bancada de teste. Nesta seção serão comparados os resultados apresentados na Tabela 3, na Tabela 5 e nos gráficos considerando os ângulos de disparo supracitados. Sendo assim, observa-se que:

- O fator de forma da ponte modificada controlada é menor que o fator de forma da ponte convencional, porém, à medida que a corrente de neutro da ponte modificada controlada tende a valores mais próximos de zero, o valor do fator de forma da ponte modificada controlada se aproxima do valor do fator de forma da ponte convencional.
- O fator de potência da ponte modificada controlada é maior que o fator de potência da ponte convencional, porém, à medida que a corrente de neutro da ponte modificada controlada tende a valores cada vez mais próximos de zero, o valor do fator de potência da ponte modificada controlada se aproxima do valor do fator de potência da ponte convencional.

- A forma de onda da tensão de saída é dependente de quais tiristores estão operantes. Como os tiristores de fase e de neutro estão em operação, logo a forma de onda da tensão de saída é composta pelas parcelas de tensão de entrada fase-fase e pelas parcelas de tensão de entrada fase-neutro.
- A forma de onda de tensão de saída da ponte modificada controlada é composta por quatro parcelas de tensão de entrada fase-fase e duas parcelas de tensão de entrada fase-neutro, sendo que: no semi-ciclo positivo da corrente de entrada de cada fase, a tensão de saída é composta de duas parcelas de tensão de entrada fase-fase e uma parcela de tensão de entrada fase-neutro ($V_{ab} + V_{ac} + V_{an}$ ou $V_{bc} + V_{ba} + V_{bn}$ ou $V_{ca} + V_{cb} + V_{cn}$); no semi-ciclo negativo da corrente de entrada de cada fase, a tensão de saída é composta de duas parcelas de tensão de entrada fase-fase e uma parcela de tensão de entrada fase-neutro ($-V_{ab} + -V_{ac} + -V_{an}$ ou $-V_{bc} + -V_{ba} + -V_{bn}$ ou $-V_{ca} + -V_{cb} + -V_{cn}$).
- As formas de onda da corrente de entrada de fase da ponte modificada controlada e da ponte convencional são do tipo retangulares.
- A forma de onda da corrente de entrada de neutro da ponte modificada controlada é retangular e diferente de zero, sendo que o seu valor pode se aproximar de zero, quanto mais o fator de forma da ponte modificada controlada se aproximar do fator de forma da ponte convencional.
- A ponte convencional não possui corrente de neutro, uma vez que o tiristores de neutro T7 e T8 estão inoperantes, pois o circuito de controle de disparo auxiliar está desenergizado.
- Podem ocorrer ajustes específicos de ângulos de disparo principal e auxiliar (α e δ) de tal forma que a corrente de neutro assuma valor igual a zero.
- As formas de onda da corrente de entrada de fase da ponte modificada controlada e da ponte convencional são do tipo retangulares e com intervalos de condução diferentes, sendo que, à medida que a corrente de neutro da ponte modificada controlada tende a valores mais próximos de zero, o intervalo de condução da corrente de fase da ponte modificada controlada tende a se igualar ao intervalo de condução da corrente de fase da ponte convencional.

6.3 Análise dos resultados da bancada de teste

Embora os resultados obtidos experimentalmente, em parte dos estudos de caso, sejam mais distantes dos obtidos pelas equações teóricas, conforme mostrados na Tabela 2, na Tabela 3, na Tabela 4 e na Tabela 5, os resultados são considerados satisfatórios, uma vez que os conceitos teóricos apresentados por V.R. Stefanovic 1979 [2] entre ponte modificada controlada e ponte convencional são confirmados, pela constatação da melhoria do fator de potência e a aderência qualitativa dos resultados comparativos de distorção harmônica de corrente e de corrente eficaz.

Comparando as formas de onda obtidas experimentalmente e as apresentadas nas referências bibliográficas, observa-se que estas apresentam formatos similares; também a resposta da ponte modificada controlada obtida experimentalmente em função dos ângulos de disparo principal e auxiliar apresentam comportamentos alinhados aos conceitos teóricos apresentados por V.R. Stefanovic 1979 [2].

7 CONCLUSÕES

Foi desenvolvida e implementada em laboratório, uma bancada de teste que funciona como ponte modificada controlada e como ponte convencional, tomando como base uma placa eletrônica de 6 pulsos para disparo de tiristores, apresentada por G.R.S. Mendonça 2002 [27], M. C. Cardoso 2016/2017 [28] e V.Z. Silva 2018 [31]. Os testes foram feitos considerando para as pontes supracitadas o critério da mesma tensão média de saída e permitiram avaliar os resultados experimentais e preencher lacunas na análise comparativa com os conceitos teóricos.

A análise dos resultados da ponte modificada controlada foi baseada na comparação com as citações de V.R. Stefanovic 1979 [2] e G. Olivier 1982 [18], em termos de vantagens e desvantagens, equações de correlação entre as variáveis de entrada e de saída, faixas de variação dos ângulos de disparo dos tiristores; também foi baseada na comparação das formas de onda desenvolvidas por A.J.J. Rezek 1990 [21].

Da comparação dos resultados experimentais da bancada de teste, operando como ponte modificada controlada e como ponte convencional, frente aos conceitos teóricos, observou-se que a ponte modificada controlada apresenta vantagens sobre a ponte convencional, sendo evidenciados: maior fator de potência; menor corrente eficaz de linha. No tocante as desvantagens são apontadas: aumento de distorção harmônica no lado de corrente alternada. Também pode-se considerar como desvantagens da ponte modificada controlada frente a ponte convencional: aumento da complexidade do circuito de controle de disparo dos tiristores; custo adicional com inclusão dos tiristores de neutro, custo adicional com a inclusão do circuito de controle de disparo auxiliar.

Além disso, observou-se que as formas de onda da tensão de saída CC, da ponte modificada controlada, podem apresentar diferenças em função dos intervalos de ajuste dos ângulos de disparo principal e auxiliar, considerando o critério da mesma tensão média de saída, de forma que: no intervalo de $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$ a ponte modificada controlada apresenta forma de onda da tensão de saída em CC idêntica à da ponte convencional; no intervalo de $30^{\circ} < \alpha \leq 150^{\circ}$ e $\delta \geq 0^{\circ}$, a ponte modificada

controlada apresenta forma de onda da tensão de saída CC diferente à da ponte convencional.

Após várias medições com o uso de dois modelos diferentes de medidores (AQE1 e AQE2), observou-se um melhor resultado com o medidor AQE2, conforme mostrado na Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5. Salienta-se que o AQE2 não permite realizar oscilografias de formas de onda de tensão e de corrente, bem como dos espectros harmônicos, sendo preferida a utilização do AQE1, considerando que a análise qualitativa dos resultados experimentais frente aos conceitos teóricos se mostrou consistente para os dois medidores.

Com base nas considerações dos parágrafos anteriores, pode-se dizer que a ponte modificada controlada atingiu o objetivo esperado, uma vez que os resultados experimentais são consistentes e alinhados às referências bibliográficas.

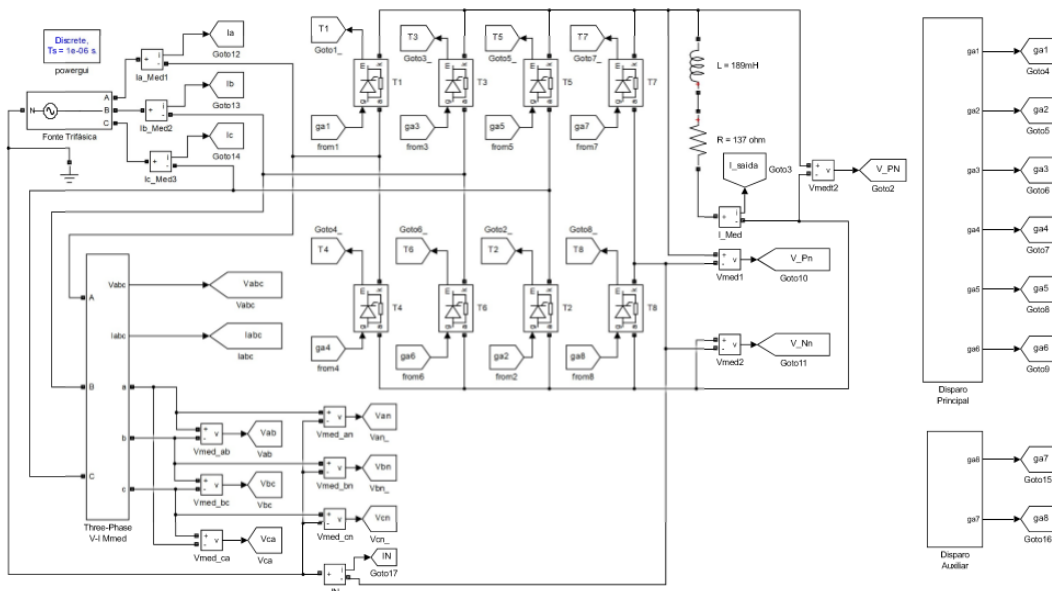
Embora a ponte modificada controlada operando como ponte retificadora, apresente melhor fator de potência que a ponte convencional, o sistema de controle de disparo dos tiristores da ponte modificada controlada é mais complexo, sendo recomendada a aplicação da ponte modificada semicontrolada devido a simplicidade de circuito de disparo e menor custo de implementação. Para a ponte modificada controlada operando como ponte inversora, se faz necessário a implementação de ponte totalmente controlada.

Da implementação da bancada de teste, outras oportunidades podem ser exploradas, tais como: acionamento de motores síncronos; aplicação em cascatas subsíncronas; implementação de pontes modificadas de doze pulsos.

8 ANEXOS

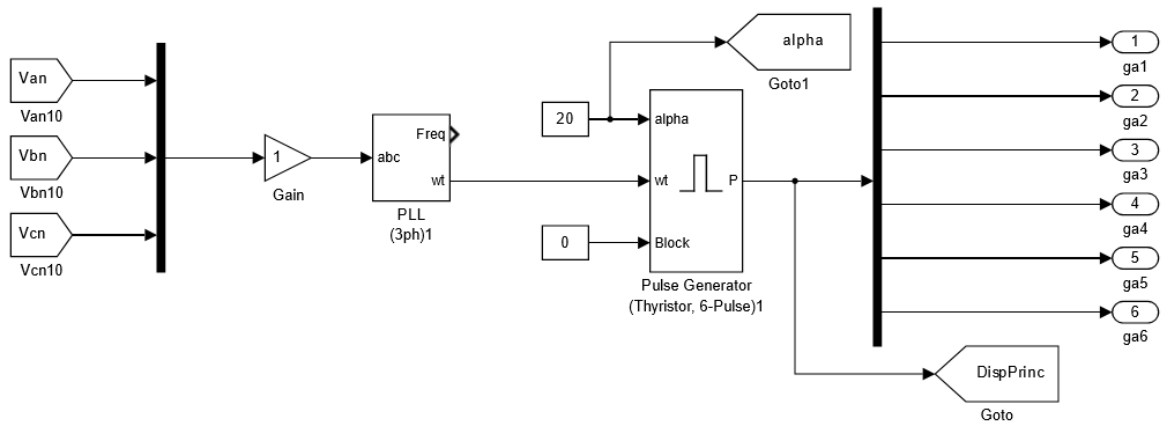
8.1 Diagrama de blocos da ponte modificada controlada no Matlab / Simulink

Com o auxílio do Diagrama de blocos do Anexo 1 foi simulado digitalmente o funcionamento da ponte modificada controlada. Aqui são mostrados os gráficos de formas de onda para diferentes ângulos de disparo dos tiristores de fase e dos tiristores de neutro, tais como: tensões de entrada (V_{an} , V_{bn} , V_{cn} , V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}), tensão de saída (V_{PN}), tensão nos tiristores de neutro (V_{Pn} , V_{Nn}); correntes nos tiristores de fase (I_{T1} , I_{T2} , I_{T3} , I_{T4} , I_{T5} , I_{T6}), correntes nos tiristores de neutro (I_{T7} , I_{T8}), correntes de entrada (I_a , I_b , I_c), corrente de neutro (I_N), corrente de saída ($I_{saída}$).



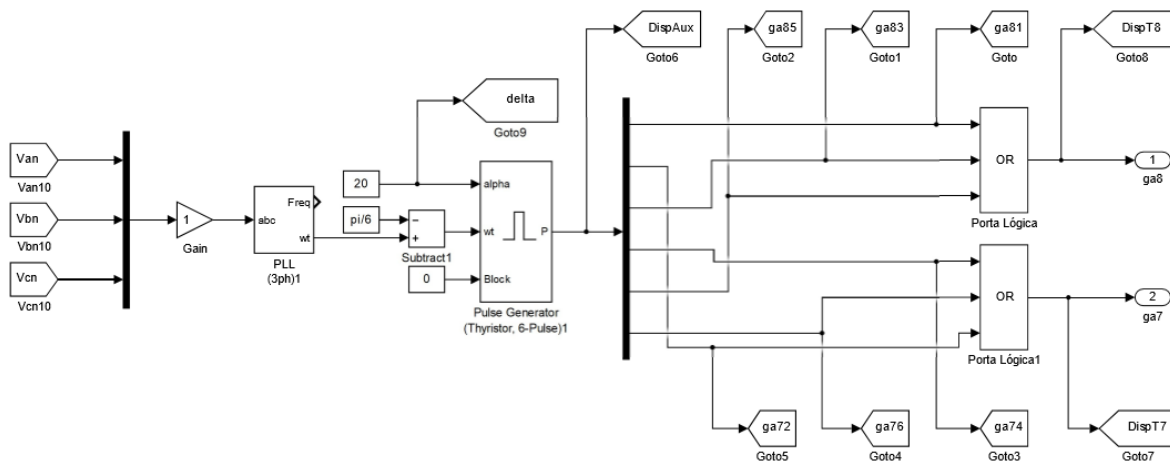
Anexo 1: Ponte modificada controlada – circuito de potência

No Anexo 2 é mostrado o diagrama de blocos do disparo principal desenvolvido no Matlab/Simulink, para acionamento dos tiristores de fase da ponte modificada controlada.



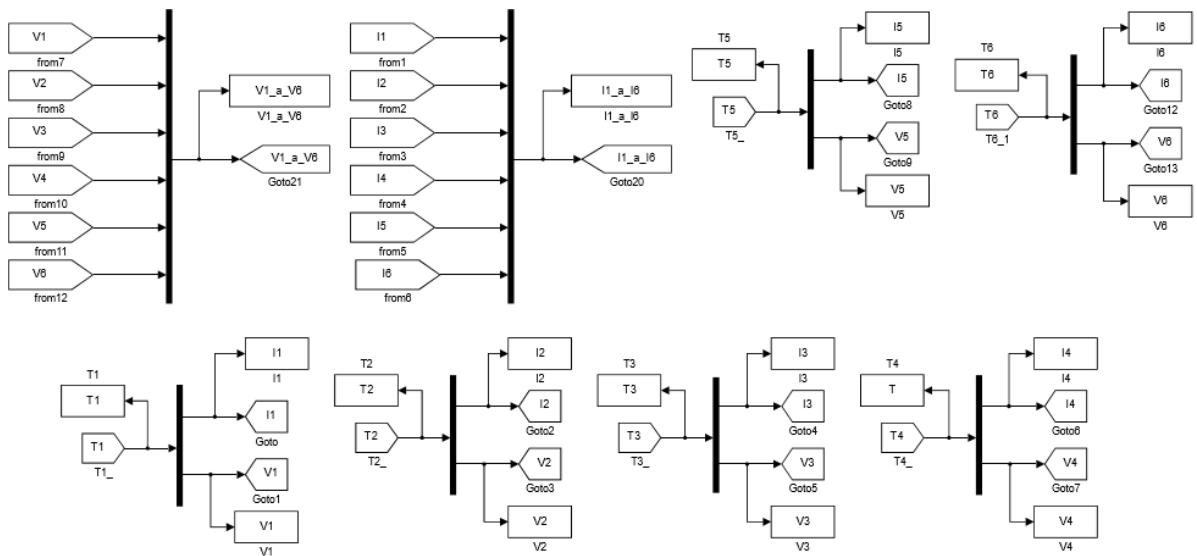
Anexo 2: Ponte modificada controlada – disparo principal

No Anexo 3 é mostrado o diagrama de blocos do disparo auxiliar desenvolvido no Matlab/Simulink, para acionamento dos tiristores de neutro da ponte modificada controlada.



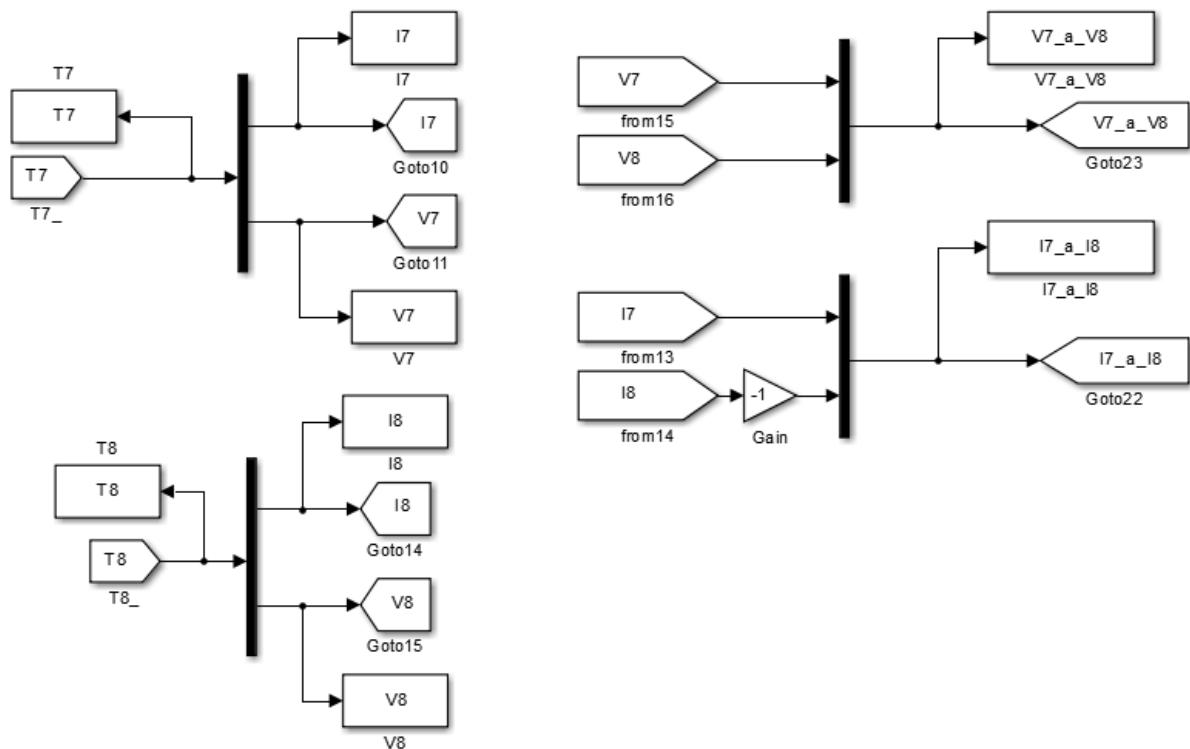
Anexo 3: Ponte modificada controlada – disparo auxiliar

No Anexo 4 é mostrado o diagrama de blocos de sinais de tensão e corrente de entrada e saída, e de disparo principal dos tiristores de fase desenvolvido no Matlab/Simulink, para obtenção das formas de onda oriundas da simulação digital da ponte modificada controlada.



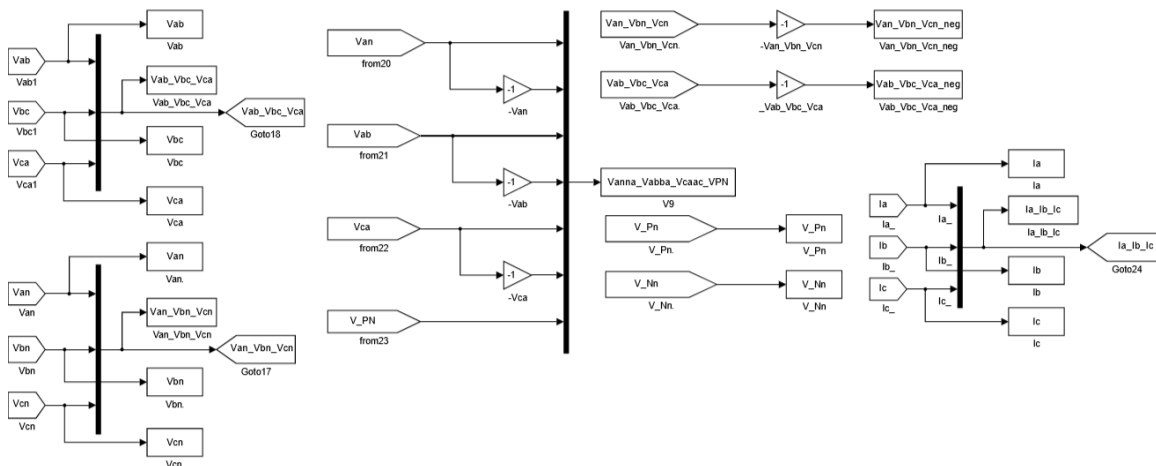
Anexo 4: Ponte modificada controlada – tensão e corrente nos tiristores de fase

No Anexo 5 é mostrado o diagrama de blocos de sinais de tensão e corrente nos tiristores de neutro, desenvolvido no Matlab/Simulink, para obtenção das formas de onda oriundas da simulação digital da ponte modificada controlada.



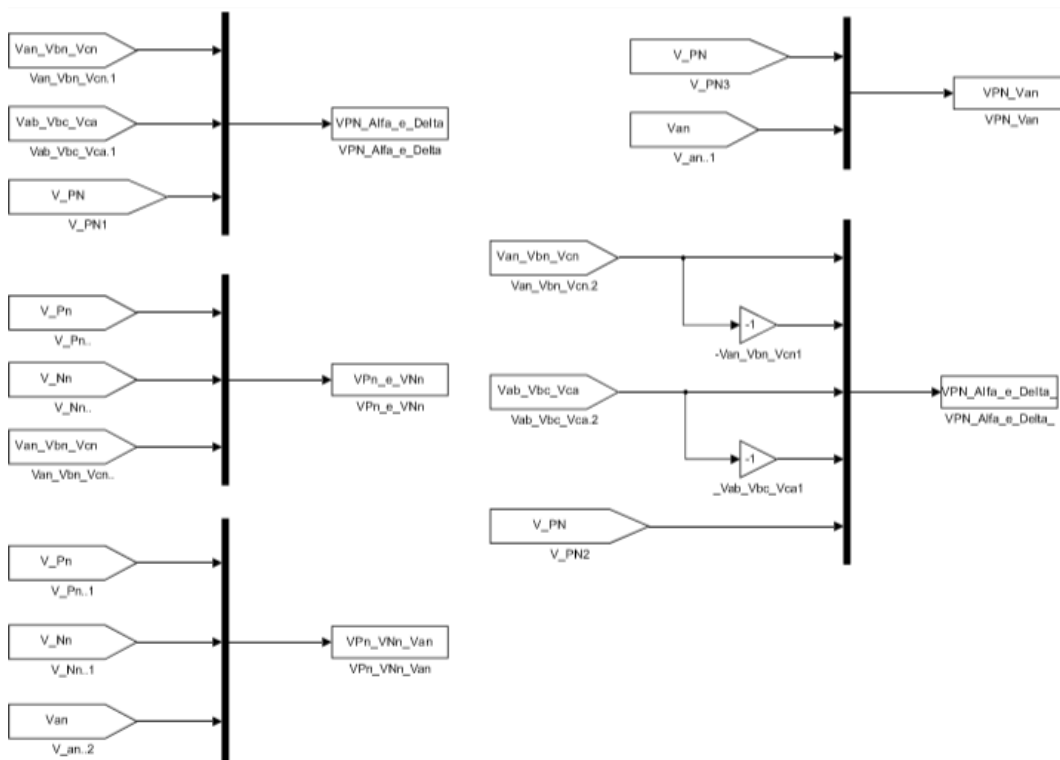
Anexo 5: Ponte modificada controlada – tensão e corrente nos tiristores de neutro

No Anexo 6 é mostrado o diagrama de blocos de sinais de tensão e corrente de entrada e de saída, desenvolvido no Matlab/Simulink, para obtenção das formas de onda oriundas da simulação digital da ponte modificada controlada.



Anexo 6: Ponte modificada controlada – tensão e corrente de entrada/saída

No Anexo 7 é mostrado o diagrama de blocos de sinais de tensão e corrente de entrada e de saída, desenvolvido no Matlab/Simulink, para obtenção das formas de onda oriundas da simulação digital da ponte modificada controlada.



Anexo 7: Ponte modificada controlada – tensão de entrada/saída

No Anexo 8 é mostrado o código Matlab/Simulink utilizado para obter as formas de onda de tensão e de corrente da ponte modificada controlada.

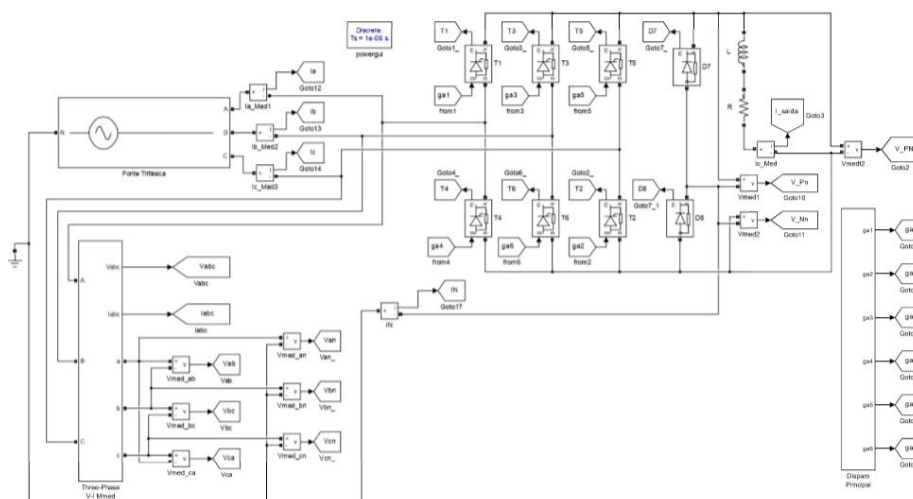
Ponte modificada controlada – código Matlab / Simulink

```
% Ponte conversora modificada CA-CC (6 tiristores de fase + 2 tiristores de neutro) para Alfa e Delta qualquer
%
%
% 1) Tensão de saída e corrente de entrada
figure(1);
% sinal AC trifásico 220V/60Hz
ax1=subplot(3,1,1);plot(VPN_Alfa_e_Delta);title('tensão de entrada/saída');axis tight ;xlabel('tempo
(s)');ylabel('V');grid on;grid minor;xlim(ax1,[0.125 0.150]);legend('Van','Vbn','Vcn','-Van','-Vbn','-
Vcn','Vab','Vbc','Vca','-Vab','-Vbc','-Vca','VPN');
% corrente de entrada da fase "A"
ax2=subplot(3,1,2); plot(Ia, 'r');title('corrente de entrada (fase A)');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid
on;grid minor;xlim(ax2,[0.125 0.150]);legend('Ia')
% corrente de neutro
ax3=subplot(3,1,3); plot(IN);title('corrente de neutro');axis tight;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid on;grid
minor;xlim(ax3,[0.125 0.150]);ylim([-2 2]);legend('I_N')
%
%
% 2) Tensão de saída, corrente de entrada e tensão nos tiristores
figure(2);
% sinal AC trifásico 220V/60Hz (referido a fase A)
ax1=subplot(4,1,1);plot(Vanna_Vabba_Vcaac_VPN);title('tensão de entrada / saída');axis tight ;xlabel('tempo
(s)');ylabel('V');grid on;grid minor;xlim(ax1,[0.125 0.150]);legend('Van','-Van','Vab','-Vab','Vca','-Vca','VPN');
% corrente de entrada da fase "A"
ax2=subplot(4,1,2);plot(Ia, 'r');title('corrente de entrada (fase A)');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid
on;grid minor;xlim(ax2,[0.125 0.150]);legend('Ia');
% tensão nos diodos de neutro
ax3=subplot(4,1,3); plot(VPn_VNn_Van);title('tensão nos tiristores de neutro');axis tight;xlabel('tempo
(s)');ylabel('A');grid on;grid minor;xlim(ax3,[0.125 0.150]);legend('VPn','VNn','Van')
% corrente de neutro
ax4=subplot(4,1,4); plot(IN, 'b');title('corrente de neutro');axis tight;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid on;grid
minor;xlim(ax4,[0.125 0.150]);ylim([-4 4]);legend('I_N')
%
%
% 3) Correntes nos tiristores de fase e correntes de entrada
figure(3);
% corrente na fase A
ax1=subplot(9,1,1);plot(Ia,'c');title('corrente de entrada / tiristores de fase');axis tight ;xlabel('tempo
(s)');ylabel('A');grid on;grid minor;xlim(ax1,[0.125 0.150]);legend('Ia = I_T_1 - I_T_4');
% corrente no tiristor T1
ax2=subplot(9,1,2);plot(I1,'r');title(' ');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid on;grid
minor;xlim(ax2,[0.125 0.150]);legend('I_T_1');
% corrente no tiristor T4
ax3=subplot(9,1,3);plot(I4,'y');title(' ');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid on;grid
minor;xlim(ax3,[0.125 0.150]);legend('I_T_4');
% corrente na fase B
ax4=subplot(9,1,4);plot(Ib,'m');title(' ');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid on;grid
minor;xlim(ax4,[0.125 0.150]);legend('Ib = I_T_3 - I_T_6');
% corrente no tiristor T3
ax5=subplot(9,1,5);plot(I3,'m');title(' ');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid on;grid
minor;xlim(ax5,[0.125 0.150]);legend('I_T_3');
% corrente no tiristor T6
ax6=subplot(9,1,6);plot(I6,'b');title(' ');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid on;grid
minor;xlim(ax6,[0.125 0.150]);legend('I_T_6');
% corrente na fase C
ax7=subplot(9,1,7);plot(Ic,'y');title(' ');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid on;grid
minor;xlim(ax7,[0.125 0.150]);legend('Ic = I_T_5 - I_T_2');
% corrente no tiristor T5
ax8=subplot(9,1,8);plot(I5,'k');title(' ');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid on;grid
minor;xlim(ax8,[0.125 0.150]);legend('I_T_5');
% corrente no tiristor T2
ax9=subplot(9,1,9);plot(I2,'c');title(' ');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('A');grid on;grid
minor;xlim(ax9,[0.125 0.150]);legend('I_T_2');
%
%
```

Anexo 8: Ponte modificada controlada – código Matlab / Simulink

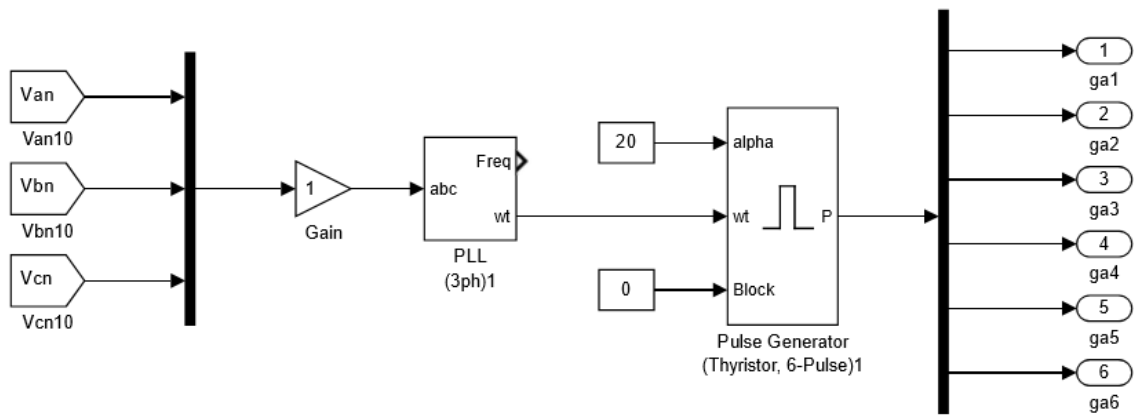
8.2 Diagrama de blocos da ponte modificada semicontrolada no Matlab / Simulink

Com o auxílio do diagrama de blocos do Anexo 9 é simulado digitalmente o funcionamento da ponte modificada semicontrolada. Aqui são mostrados os gráficos de formas de onda para diferentes ângulos de disparo dos tiristores de fase e dos tiristores de neutro, tais como: tensões de entrada (V_{an} , V_{bn} , V_{cn} , V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}), tensão de saída (V_{PN}), tensão nos tiristores de neutro (V_{PN} , V_{Nn}); correntes nos tiristores de fase (I_{T1} , I_{T2} , I_{T3} , I_{T4} , I_{T5} , I_{T6}), correntes nos tiristores de neutro (I_{T7} , I_{T8}), correntes de entrada (I_a , I_b , I_c), corrente de neutro (I_N), corrente de saída ($I_{saída}$).



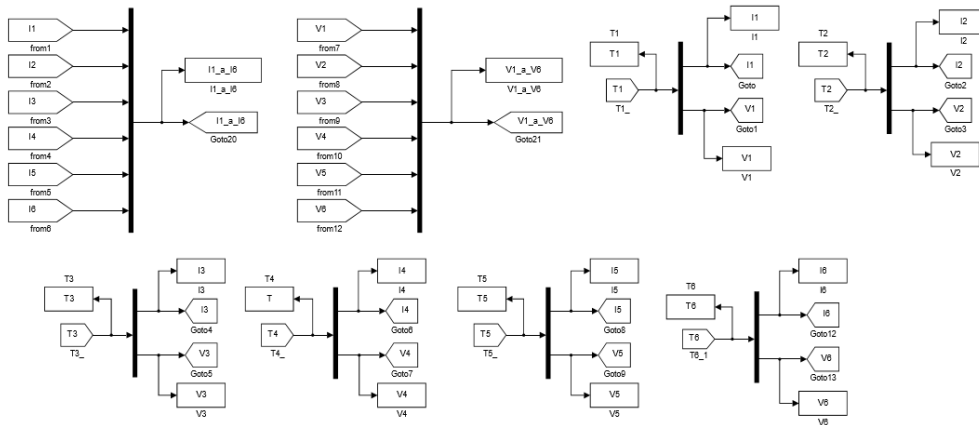
Anexo 9: Ponte modificada semicontrolada – circuito de potência

No Anexo 10 é mostrado o diagrama de blocos do disparo principal desenvolvido no Matlab/Simulink, para acionamento dos tiristores de fase da ponte modificada semicontrolada.



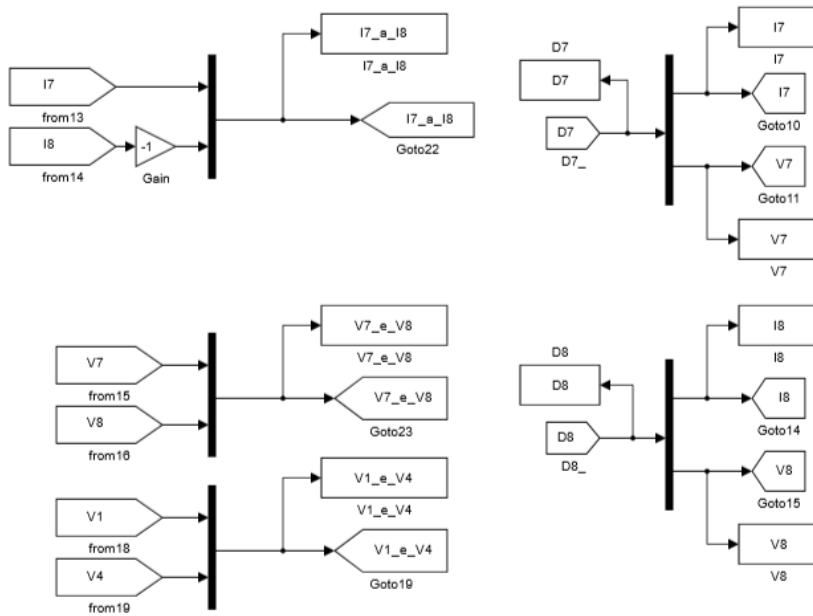
Anexo 10: Ponte modificada semicontrolada – disparo principal

No Anexo 11 é mostrado o diagrama de blocos de sinais de tensão nos tiristores de fase, desenvolvido no Matlab/Simulink, para a ponte modificada semicontrolada.



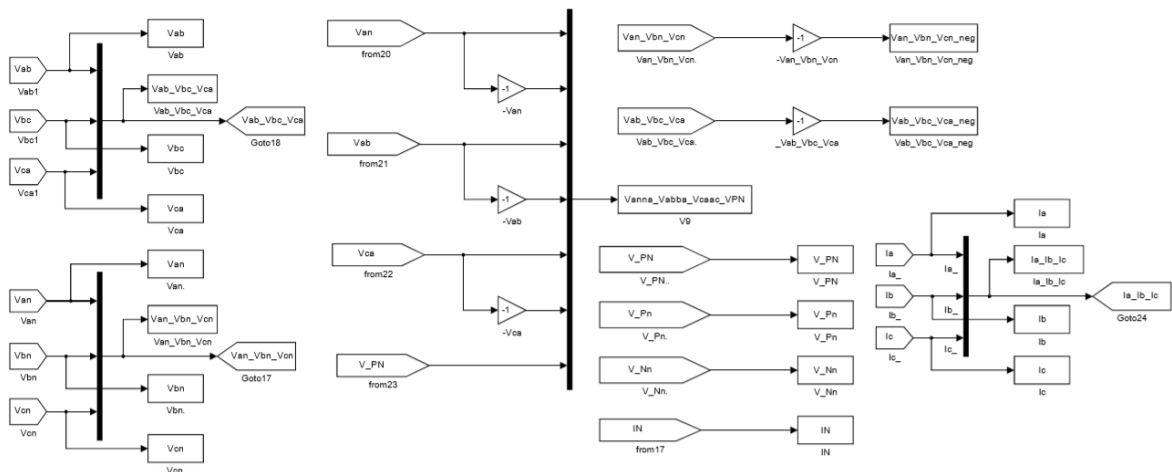
Anexo 11: Ponte modificada semicontrolada – tensão e corrente nos tiristores de fase

No Anexo 12 é mostrado o diagrama de blocos de sinais de tensão e corrente dos diodos de neutro, desenvolvido no Matlab/Simulink, para a ponte modificada semicontrolada.



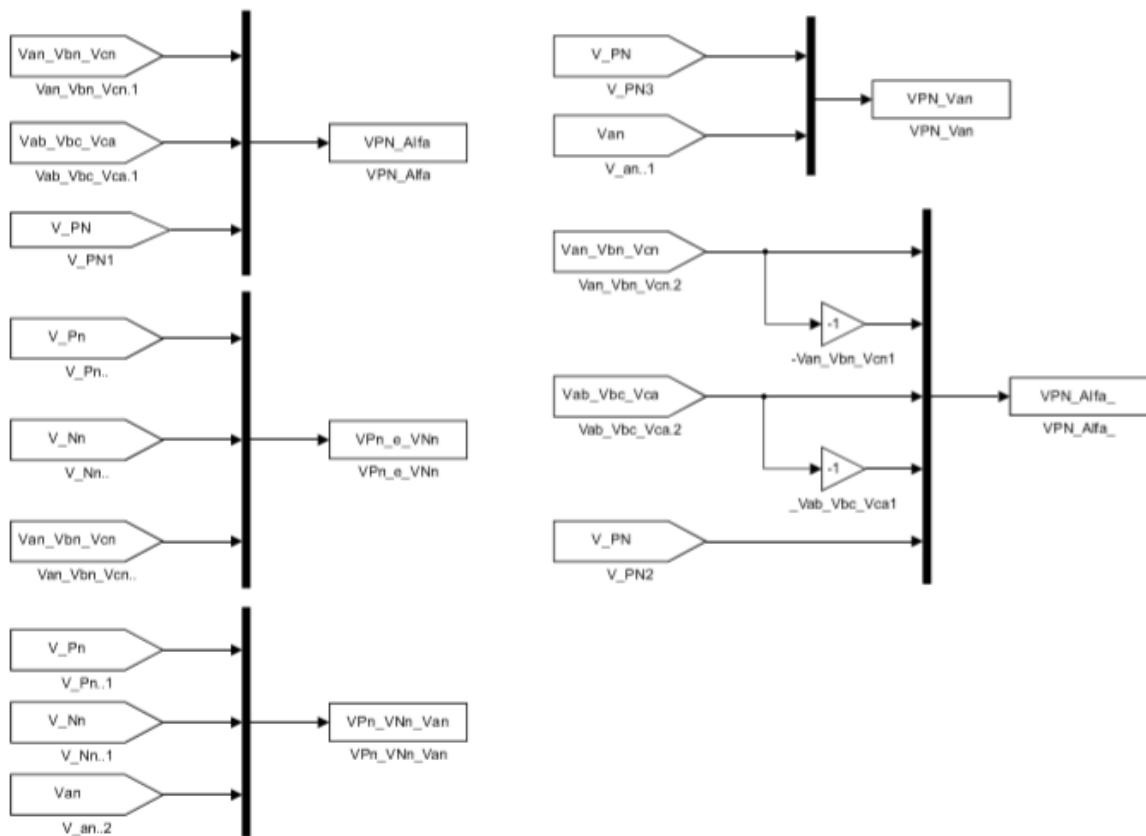
Anexo 12: Ponte modificada semicontrolada – tensão e corrente nos diodos de neutro

No Anexo 13 é mostrado o diagrama de blocos de sinais tensão e corrente de entrada e de saída, desenvolvido no Matlab/Simulink, para a ponte modificada semicontrolada.



Anexo 13: Ponte modificada semicontrolada – tensão e corrente de entrada/saída

No Anexo 14 é mostrado o diagrama de blocos de sinais de tensão de entrada e de saída, e dos diodos de neutro, desenvolvido no Matlab/Simulink, para a ponte modificada semicontrolada.



Anexo 14: Ponte modificada semicontrolada – tensão entrada/saída e diodos de neutro

No Anexo 15 é mostrado o código Matlab/Simulink utilizado para obter as formas de onda de tensão e de corrente da ponte modificada semicontrolada.

Ponte modificada semicontrolada – código Matlab / Simulink

```

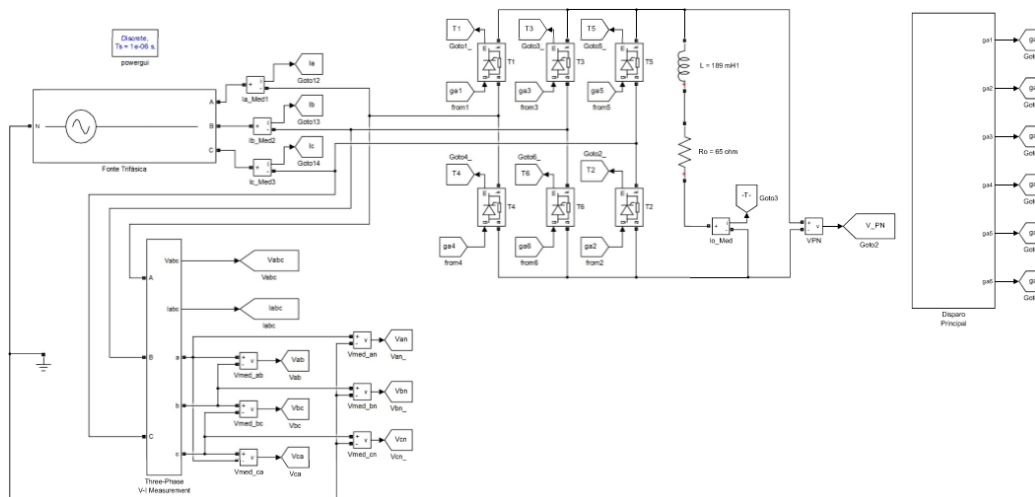
%%Ponte conversora modificada semicontrolada CA-CC (6 tiristores de fase + 2 diodos de neutro) para ângulo de disparo
alpha qualquer
%
% 1) Tensão de saída e corrente de entrada
figure(1);
% sinal AC trifásico 220V/60Hz
ax1=subplot(4,1,1);plot(VPN_Alfa_);title('tensão de entrada / saída');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('(V)');grid
on;grid minor;xlim(ax1,[0.125 0.150]);legend('Van','Vbn','Vcn','-Van','-Vbn','-Vcn','Vab','Vbc','Vca','-Vab','-Vbc','
-Vca','VPN');
ax2=subplot(4,1,2);plot(Ia, 'r');title('corrente de entrada (fase A)');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('(A)');grid
on;grid minor;xlim(ax2,[0.125 0.150]);legend('Ia');
% tensão nos diodos de neutro
ax3=subplot(4,1,3); plot(VPn_VNn_Van);title('tensão nos diodos de neutro');axis tight;xlabel('tempo
(s)');ylabel('(V)');grid on;grid minor;xlim(ax3,[0.125 0.150]);legend('VPn','VNn','Van')
% corrente de neutro
ax4=subplot(4,1,4); plot(IN, 'b');title('corrente de neutro');axis tight;xlabel('tempo (s)');ylabel('(A)');grid on;grid
minor;xlim(ax4,[0.125 0.150]);grid minor;ylim([-4 4]);legend('I_N')
%
%

```

Anexo 15: Ponte modificada semicontrolada – código Matlab / Simulink

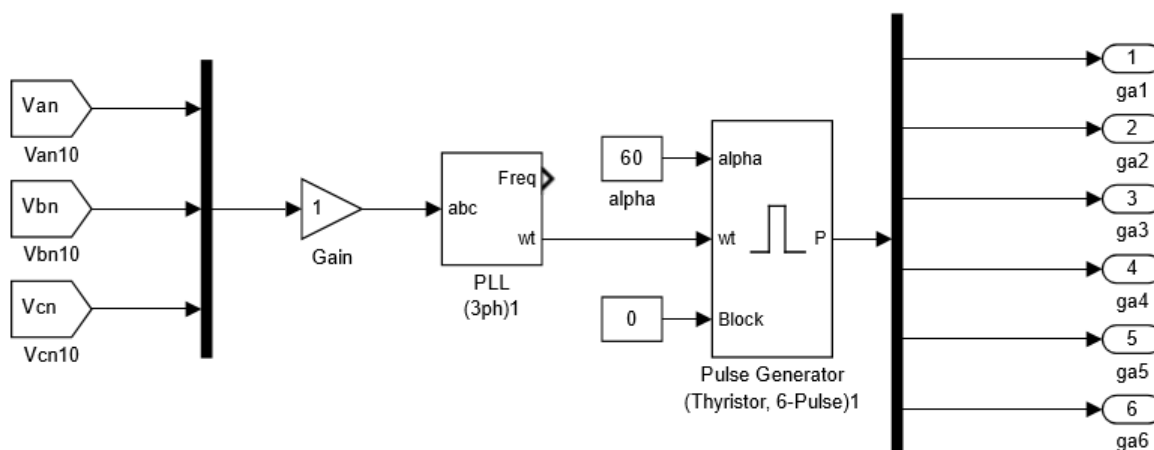
8.3 Diagrama de blocos da ponte convencional no Matlab / Simulink

Com o auxílio do Diagrama de blocos do Anexo 16 é simulado digitalmente o funcionamento da ponte convencional. Aqui são mostrados os gráficos de formas de onda para diferentes ângulos de disparo dos tiristores de fase, tais como: tensões de entrada (V_{an} , V_{bn} , V_{cn} , V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}), tensão de saída (V_{PN}), correntes nos tiristores de fase (I_{T1} , I_{T2} , I_{T3} , I_{T4} , I_{T5} , I_{T6}), correntes de entrada (I_a , I_b , I_c), corrente de saída ($I_{saída}$).



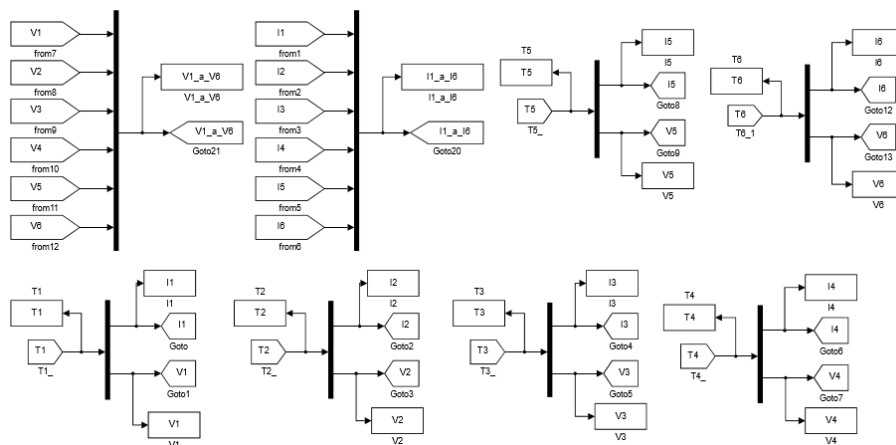
Anexo 16: Ponte convencional – circuito de potência

No Anexo 17 é mostrado o diagrama de blocos do disparo principal desenvolvido no Matlab/Simulink, para a ponte convencional.



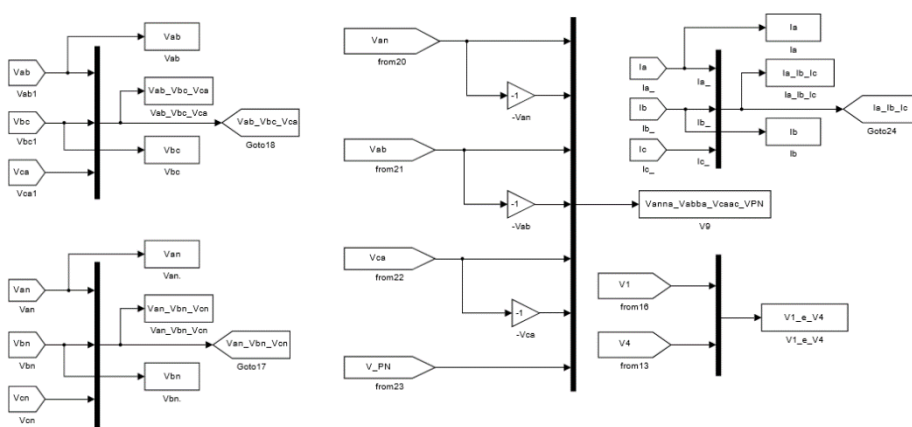
Anexo 17: Ponte convencional – disparo principal

No Anexo 18 é mostrado o diagrama de blocos de sinais de tensão e corrente nos tiristores de fase, desenvolvido no Matlab/Simulink, para acionamento dos tiristores de fase da ponte convencional.



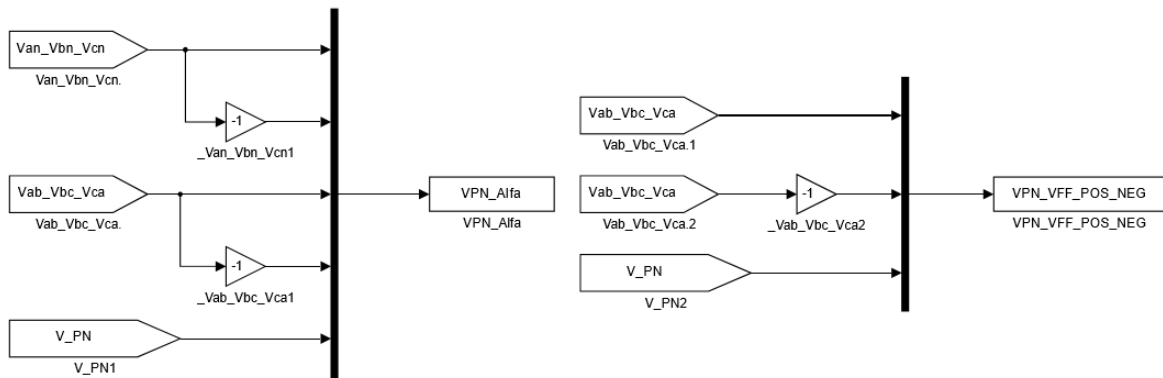
Anexo 18: Ponte convencional – tensão e corrente nos tiristores de fase

No Anexo 19 é mostrado o diagrama de blocos de sinais de tensão e corrente de entrada e saída, desenvolvido no Matlab/Simulink, para a ponte convencional.



Anexo 19: Ponte convencional – tensão e corrente de entrada/saída

No Anexo 20 é mostrado o diagrama de blocos de sinais de tensão de entrada e saída, desenvolvido no Matlab/Simulink, para a ponte convencional.



Anexo 20: Ponte convencional – tensão de entrada/saída

No Anexo 21 é mostrado o código Matlab/Simulink utilizado para obter as formas de onda de tensão e de corrente da ponte convencional.

Ponte convencional – código Matlab / Simulink

```

%
% Ponte conversora convencional CA-CC (6 tiristores) para ângulo de disparo alfa qualquer
%
%
% 1) Tensão de entrada/saída e corrente de entrada
figure(1);
% sinal AC trifásico 220V/60Hz
ax1=subplot(2,1,1);plot(VPN_Alfa);title('tensão de entrada / saída');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('(V)');grid
on;grid minor;xlim(ax1,[0.125 0.150]);legend('Van','Vbn','Vcn','-Van','-Vbn','-Vcn','Vab','Vbc','Vca','-Vab','-Vbc','-
Vca','VPN');
% corrente de entrada da fase "A"
ax2=subplot(2,1,2); plot(Ia, 'r');title('corrente de entrada (fase A)');axis tight ;xlabel('tempo (s)');ylabel('(A)');grid
on;grid minor;xlim(ax2,[0.125 0.150]);legend('Ia');
%
%

```

Anexo 21: Ponte convencional – código Matlab / Simulink

9 REFERÊNCIAS

- [1] E. Guardia [et al]. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria: uma visão institucional: sumário executivo.** Brasília: CNI, 2010. Acesso: 30/10/18. Disponível:<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={CC307349-3D35-47FE-B77C-3C548F6DB747}>.
- [2] V.R. Stefanovic. **Power factor improvement with a modified phase controlled converter.** IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-15, pp 193-201, March/April/1979.
- [3] IEEE IAS Static Power Converter Committee. **Guide for harmonic control and reactive compensation of static power converters.** Conf. Record of the IEEE IAS International Semiconductor Power Converter Conf., pp. 172-176, 1977.
- [4] E. Uhlmann. **Die verbesserung des leistungsfaktors der gittergesteuerten gleichrichtern.** Elektrotechnik und Maschinenbau. Vol. 55, Nº 26/27, pp. 309, 1937.
- [5] G. Moltgen. **Die blindleistung beim dreiphasigen stromrichter mit unsymmetrischer steuerung.** Arch. Elektrotechn. Vol. 42, pp. 272-285, 1956.
- [6] J. Koehn. **Das steuverhalten unsymmetrisch gesteuerter stromrichter und ihr blindleistungsbedarf.** Arch Elektrotechn. Vol. 43, pp. 449-480, 1958.
- [7] W. McMurray. **A study of asymmetrical gating for phase-controlled converters.** IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-8, Nº 3, pp. 289-295, May/June 1972.
- [8] F. Busemann. **Economic supply of reactive power for HVDC inverter stations.** Direct Current. pp. 8-15, June 1954.

- [9] V. P. Bakharerskii and A. M. Utevskaa, **A circuit for two stage artificial commutation of an inverter**. Direct Current. pp. 153-159, June 1957.
- [10] T. Ohnishi, H. Okitsu, and K. Nitta. **Power factor improvement and harmonic reduction in AC-DC converter by means of bias voltage control**. IEEE IAS Int. Semiconductor Power Converter Conf. pp. 383-392, Conf Record of the 1977.
- [11] F. Harashima, H.I. Inaba, and K. Tsuboi, **A closed loop control system for the reduction of reactive power required by electronic converters**. IEEE Trans. Ind. Elec. Control Inst., vol. IECI-23, no. 2, pp. 162-166, May 1976.
- [12] T. Kataoka, K. Mizumachi, and S. Miyairi, **A pulse width controlled ac to dc converter to improve power factor and waveform of ac line current**. Conf Record of the IEEE IAS Int. Semiconductor Power Converter Conf, pp. 334-339, 1977.
- [13] J. R. Sylvester and S. B. Dewan. **Thyristor controlled rectified inverting at unity power factor**. Conf Record of the IEEE Power Electronics Specialists Conf., 1977.
- [14] E. Uhlmann. **Die verbesserung des leistungsfaktors der gittergesteuerten gleichrichter mittels zusatzlicher anoden**. Elektrotechnik und Maschinenbau, Vol. 50, pp. 649-651, Dec. 1933.
- [15] Hermle and Partzsch. **Die elektrische ausrustung der AEGstromrichter-locomotive fur die hollentalbahn, reihe 224 NR.01**. Elektrische Bahnen. pp. 59-68, 1937.
- [16] B.R. Pelly. **Thyristor phase-controlled converters**. New York: Wiley, pp. 66-110, 1971.
- [17] R. Jotten. **Leistungselektronik**. Wiesbaden, Vieweg. Vol. I, pp. 146, 1977.

- [18] G. Olivier, V.R. Stefanovic. **Thyristor current source with an improved power factor**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 1E-29, pp 299-307, 1982.
- [19] G. Olivier, V. R. Stefanovic, G.E. April. **Evaluation of phase-commutated converters for slip-power control in induction drives**. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-19, N^o. 1, pp 105-112, January/February 1983.
- [20] P.P.A. Caldeira, Student member IEEE and Edson H. Watanabe, member IEEE. **Compensation of power factor in rectifier systems utilized in oil drilling rigs**. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, N^o 2, pp 301-307, March/April 1988.
- [21] A.J.J. Rezek, V.F.Silva, L.E.B.Silva, J.P.G.Abreu, Instituto de Engenharia Elétrica, Escola Federal de Engenharia de Itajubá. M.S.Miskulin, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas. **Digital simulation of six and twelve-pulse converters with a modified thyristor bridge**. IV Congresso Latinoamericano de Control Automático, Puebla, Puebla, México, pp 455-460, Novembre/1990.
- [22] J.R. Cogo; A.J.J. Rezek e outros. **Projeto e implementação de um simulador de sistema de transmissão em corrente contínua - Parte 1**. Convênio EFEI / FINEP, 1985.
- [23] J.R. Cogo; C.A.M. Pinheiro. **Sistema de disparo de tiristores (SCR) em redes trifásicas**. Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico , EFEI, v. VIII, p. 15-24, 1982.
- [24] J.A. Pomílio. **Power electronic, Chap. 3. DSE – FEEC, UNICAMP**. Acesso 31/03/2019. <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/eltpot/cap3.pdf>, 2014.
- [25] J.M. Schaefer. **Rectifier circuits: theory and design**. John Willey and Sons, Inc., 1965.

- [26] Y.R. de Souza. **Análise da interação entre elos de corrente contínua em redes eletricamente próximas**. Dissertação M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.
- [27] G.R.S. Mendonça. **Circuito eletrônico para o comando de disparo de uma ponte trifásica tiristorizada**. TFG (Trabalho Final de Graduação UNIFEI), 2002.
- [28] M.C. Cardoso. **Chopper transistorizado para acionamento de carrinho transportador, utilizando motor de corrente contínua de ímã permanente**. (Relatório parcial da pesquisa de iniciação científica, UNIFEI), PIVIC 2016/2017.
- [29] SIEMENS. **Folha de dados do circuito integrado TCA 785**. Acesso: 18/08/2018. Disponível: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=TCA785&sField=4>.
- [30] N.C. Braga. **O circuito integrado 555, o circuito mágico**. Instituto NCB. Editora Newton C. Braga São Paulo – 2016. Acesso: 18/08/2019. Disponível: <http://www.newtoncbra.com.br>.
- [31] V.Z. Silva.; A.J.J. Rezek; C A.P. Camacho. **Innovative and useful laboratory experiments of electrical machines**. Federal University of Itajubá UNIFEI, Energy and Electric System Institute ISEE, 978-620-2-31727-6, Scholar's Press Editorl, 2018.
- [32] M.L. Ramos; K.H.D.D. Carmo; R.B. Bicalho; R.D. Lorenzo; A.J.J. Rezek – ISEE-UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil. **Implementação de ponte conversora modificada CA-CC de 8 tiristores para melhoria de fator de potência**. SEPOC 2017 - 10º Seminar on Power Electronics and Control Santa Maria, Brasil, pp 1-6, October 22-25, 2017.
- [33] M.L. Ramos; J.M.C. Filho; A.J.J. Rezek; C.E.G. Ogondola; V.Z. Silva – ISEE-UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil. **Eight thyristor AC-DC modified converter bridge implementation**. SBSE 2020 - VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Santo André, SP, Brasil, Agosto 25-28 2020.

[34] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 569, de 23 de Julho de 2013**. <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2013569.pdf>. Acesso em 21/09/2019.

[35] DATAPOOL ELETRÔNICA LTDA. **Produto / Eletroeletrônica**. Acesso 25/08/2020. Disponível: <http://eletronica.datapool.com.br/categorias/eletroeletronica/>.