



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

JULIANO COSTA LEAL DA SILVA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2013

JULIANO COSTA LEAL DA SILVA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

*Relatório de Estágio Supervisionado submetido
à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica Industrial

Orientador:

Professor Maurício B. R. Corrêa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2013

JULIANO COSTA LEAL DA SILVA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

*Relatório de Estágio Supervisionado submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia
Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica Industrial

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Maurício B. R. Corrêa, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família

AGRADECIMENTOS

Agradeço às forças do universo que me guiaram até o presente momento.

Agradeço à minha mãe Vera Lucia por não medir esforço em me ver feliz.

Agradeço ao meu pai Marcelino José pela paixão à razão.

Agradeço ao meu irmão João Marcelo pelo amor presente em seus conselhos.

Agradeço à minha namorada Roana d'Ávila por ser minha companheira desde o primeiro dia que nos conhecemos.

Ao meu primo Gabriel Costa pelo exemplo de disciplina e dedicação.

Aos professores Edison Roberto e Mauricio BR Côrrea pela paciência e positividade transmitidas.

A Adail e Tchai pela prontidão em todos os momentos.

Aos alunos da pós-graduação no LEIAM: João Helder, Antonio Isaac, Abinadabe, Luciano Barros, Ítalo Roger, Vagner Fonseca, Marcos Aurelio pela ajuda nas dúvidas inerentes ao aprendizado.

Agradeço também aos meus amigos Dorival, Bruno, Alone, Fausto. Ana Clara, Rubem, Marconni, Felipe, Pablo, Carlos Ângelo, Ruy, Victor, Lucas, Ravi, Bruno, Claudio, Marlo por todos os momentos felizes vividos.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

“Seja você a mudança que tanto quer ver no mundo.”

Mahatma Gandhi.

RESUMO

Este relatório de estágio propõe uma documentação de três atividades distintas realizadas durante o período do estágio supervisionado no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM) pertencente à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O tema central das atividades realizadas concerne no estudo, análise e obtenção de resultados experimentais em três topologias distintas de conversores multinível desenvolvidas por alunos da pós-graduação no LEIAM. As topologias objeto de estudo são: *Conversor Aninhado*, *Conversor back-to-back tipo NPC de três níveis* e *o Conversor Convencional em Cascata*. Na primeira etapa do relatório é realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema específico dos conversores multinível citados. Em seguida estão descritas as atividades realizadas em conjunto com os alunos da pós graduação e finalmente, são discutidos os resultados obtidos de cada montagem realizada. Além disso, são feitas análises sobre a metodologia e material empregados na construção dos conversores.

Palavras-chave: Conversores multinível, LEIAM, estratégias de modulação.

ABSTRACT

This report proposes a documentation of three distinct activities during the period of supervised internship in the Laboratory of Industrial Electronics and Machines Drives (LEIAM) belonging to the Federal University of Campina Grande (UFCG). The central theme concerns the activities performed in the study, and analysis of experimental results obtained in three different topologies of multilevel converters developed by graduate students in LEIAM. The first stage of this report is a literature review on the subject formulated. Then the activities are described in conjunction with the graduate students studied about converters and finally we will discuss the results of each assembly made. In addition, discussions are made about the methodology and materials used in the construction of the converters.

Keywords: Multilevel Converters, LEIAM, modulation strategies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Configurações do conversor multinível aninhado com: (a)quatro níveis, (b) cinco níveis, (c) seis níveis.....	14
Figura 2: Sentidos da corrente para cada estado de chaveamento visto na Tabela 1.....	16
Figura 3: Conversor <i>back-to-back</i> de três níveis com cinco braços.....	18
Figura 4: Circuito equivalente genérico de um conversor <i>back to back</i> de três níveis com cinco braços. .	18
Figura 5: Conversor em cascata de cinco níveis	19
Figura 6: Inversor Multinível em Cascata de: (a) Sete níveis; (b) Nove níveis.....	21
Figura 7: Regiões definidas pelos níveis de tensão e as tensoes de referencia para um conversor de quatro níveis.....	23
Figura 8: Foto do conversor aninhado de quatro níveis. (a) Arranjo dos braços no conversor aninhado (b) Estágio retificador e barramento cc.....	24
Figura 9: Diagrama de controle.....	25
Figura 10: Diagrama de controle proposto.	27
Figura 11: Foto do conversor <i>back to back</i> tipo NPC de três níveis; (a) Capacitores do barramento CC; (b) Sensor de tensão; (c) Sensores de corrente; (d) <i>Drivers</i> (e) IGBTs.....	28
Figura 12: Foto do circuito de proteção projetado. (a) Disjuntor monofásico; (b) Relé de proteção dos <i>drivers</i> ; (c)Fusíveis;(d)Relé trifásico;(e)Disjuntor trifásico.	28
Figura 13: Foto das fontes chaveadas de 15V para alimentação dos drivers e dos sensores de corrente e tensão.....	28
Figura 14: Portadoras e sinal modulante da fase “a” para modulação com portadoras deslocadas em fase do conversor em cascata de sete níveis.....	29
Figura 15: Sinais de gatilho e tensão na saída da célula <i>H1</i> para conversor de sete níveis com portadoras deslocadas em fase.	30
Figura 16: Modulante e portadoras deslocadas em nível e com a mesma disposição de fase para um conversor de cinco níveis.....	31
Figura 17: Sinais de gatilho e tensão na saída da célula <i>H1</i> para conversor de sete níveis com portadoras deslocadas em nível.	31
Figura 18: Projeto da bancada experimental de um inversor multinível de onze níveis.....	33
Figura 19: Foto da bancada experimental de um inversor de até onze níveis.	33
Figura 20: Layout do inversor na configuração de onze níveis.	34
Figura 21: Foto do circuito de proteção do conversor.....	35
Figura 22: Foto do circuito <i>on/off</i> para acionamento individual das células em ponte H.	35
Figura 23: Foto da interface do circuito de comando. (a) Conector RJ15; (b) Conector DB25.....	36
Figura 24: Foto do simulador dSPACE utilizado para gerar os sinais de chaveamento a partir da modulação específica.....	36
Figura 25: Resultados experimentais para a configuração aninhada com quatro níveis. (a) tensões de polo; (b) De cima para baixo: tensão de linha na saída, tensão de polo e corrente de fase. (c) De cima para baixo: tensão de linha na saída e corrente trifásica na carga.	38
Figura 26: De cima para baixo: Corrente de entrada para a fase a; Corrente no motor para a fase b; Tensões nos capacitores do barramento CC. Considerando as seguintes frequências de chaveamento: (a)10kHz;(b)5kHz;(c)2kHz;(d)1.19kHz.....	39
Figura 27: De cima para baixo: Tensão de fase, Tensão de linha e Corrente de linha, obtidos para um conversor em cascata de cinco níveis: (a) modulação por deslocamento de fase das portadoras; (b) modulação por deslocamento de nível das portadoras.	40
Figura 28: De cima para baixo: Tensão de fase, Tensão de linha e Corrente de linha, obtidos para um conversor em cascata de sete níveis: (a) modulação por deslocamento de fase das portadoras; (b) modulação por deslocamento de nível das portadoras.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tensões de pólo como função dos estados de chaveamento.	15
Tabela 2: Tensões de fase e estados de chaveamento para o inversor de cinco níveis	20

.

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Local do Estágio	12
1.2	Objetivos do Estágio	12
1.3	Embasamento Teórico	12
1.3.1	Conversor Multinível Aninhado (<i>Nested Multilevel</i>).....	14
1.3.2	Conversor <i>Back-to-Back</i> Tipo NPC.....	17
1.3.3	Conversor Multinível em Cascata (<i>Cascated Full Bridge Converter</i>).....	19
2	Atividades Desenvolvidas.....	22
2.1	Atividade 1.....	22
2.1.1	Estratégia de Modulação PWM.....	22
2.1.2	Montagem do Conversor Aninhado.....	24
2.2	Atividade 2.....	25
2.2.1	Estratégia de Controle	25
2.2.2	Estratégia de Modulação PWM.....	25
2.2.3	Controle das tensões dos capacitores no barramento CC.....	27
2.2.4	Montagem do Conversor NPC de três níveis back-to back	27
2.3	Atividade 3.....	29
2.3.1	Estratégia de Modulação PWM.....	29
2.3.2	Modulação com portadoras deslocadas em fase.	29
2.3.3	Modulação com portadoras deslocadas em nível.....	31
2.3.4	Montagem do Conversor Multinível em Cascata.....	33
3	Resultados Obtidos	37
3.1	Atividade 1.....	37
3.2	Atividade 2.....	39
3.3	Atividade 3.....	40
4	Conclusão.....	42
	Referências Bibliográficas.....	43

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados: o local do estágio, os objetivos gerais e o embasamento teórico das atividades realizadas, durante o período do estágio. Os conversores multinível aqui estudados foram montados no LEIAM com o objetivo de estudos específicos na área da eletrônica industrial.

1.1 LOCAL DO ESTÁGIO

O estágio foi desenvolvido no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM) pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, durante os meses de janeiro e fevereiro de 2013.

1.2 OBJETIVOS DO ESTÁGIO

Os objetivos gerais do estágio supervisionado são:

- i. Estudo e análise dos conversores multinível considerados;
- ii. Entendimento prático da metodologia e material utilizado na montagem desenvolvida;
- iii. Análise dos resultados obtidos a partir das montagens.

1.3 EMBASAMENTO TEÓRICO

Com a evolução dos dispositivos de eletrônica de potência, no que concerne à maior capacidade de condução de corrente, maiores valores de tensão quando bloqueados, além da existência de controladores com maior velocidade de processamento como os FPGAs e os DSPs, tornou-se possível a implementação do conversor multinível.

A divisão da tensão em níveis discretos durante a conversão de energia foi patenteado pelo pesquisador do *MIT*, *R.H. Baker* há mais de quarenta anos. Neste tipo

de conversão, é possível gerar na saída do conversor uma tensão próxima do seno o que contribui para uma redução no conteúdo harmônico da conversão. Foi apresentada uma série de vantagens e desvantagens dos conversores multinível quando comparado aos conversores tradicionais de dois níveis. Dentre as vantagens se destacam:

- a) Redução dos níveis de interferência eletromagnética (EMI);
- b) Possibilidade de obtenção de níveis mais altos de potência;
- c) Frequência de comutação superior à de um conversor convencional;
- d) Menor taxa de distorção harmônica devido à redução do conteúdo harmônico e conseqüentemente um maior fator de potência.

Como desvantagens, podem-se inferir:

- a) Maior complexidade do sistema devido ao maior número de chaves, aumentando o custo de implementação;
- b) Maior complexidade nas estratégias de modulação;
- c) Maior número de capacitores no barramento CC para geração dos níveis discretos de tensão na saída;

Atualmente existem diferentes topologias de conversores multinível. Dentre as topologias existentes, três foram contempladas como objetivo de estudo e análise durante o período do estágio no LEIAM:

- Conversor Multinível Aninhado (*Nested Multilevel*).
- Conversor *Back to Back* tipo NPC.
- Conversor Multinível em Cascata (*Cascated Full Bridge Converter*).

Estes conversores foram, testados experimentalmente no LEIAM.

Nas próximas seções é discutida a fundamentação teórica por trás destas topologias de conversores multinível, para em seguida, serem descritas as atividades realizadas durante o período do estágio.

1.3.1 CONVERSOR MULTINÍVEL ANINHADO (*NESTED MULTILEVEL*).

Algumas topologias de conversores multinível são conhecidas como aninhadas desde que o ponto central dos braços estão conectados ao mesmo ponto, com os braços externos envolvendo os braços internos, como pode ser visto na Figura 1. Esta topologia tem resultados equivalentes ao NPC tradicional com a vantagem de possuir um menor número de diodos e consequentemente, uma maior eficiência [1].

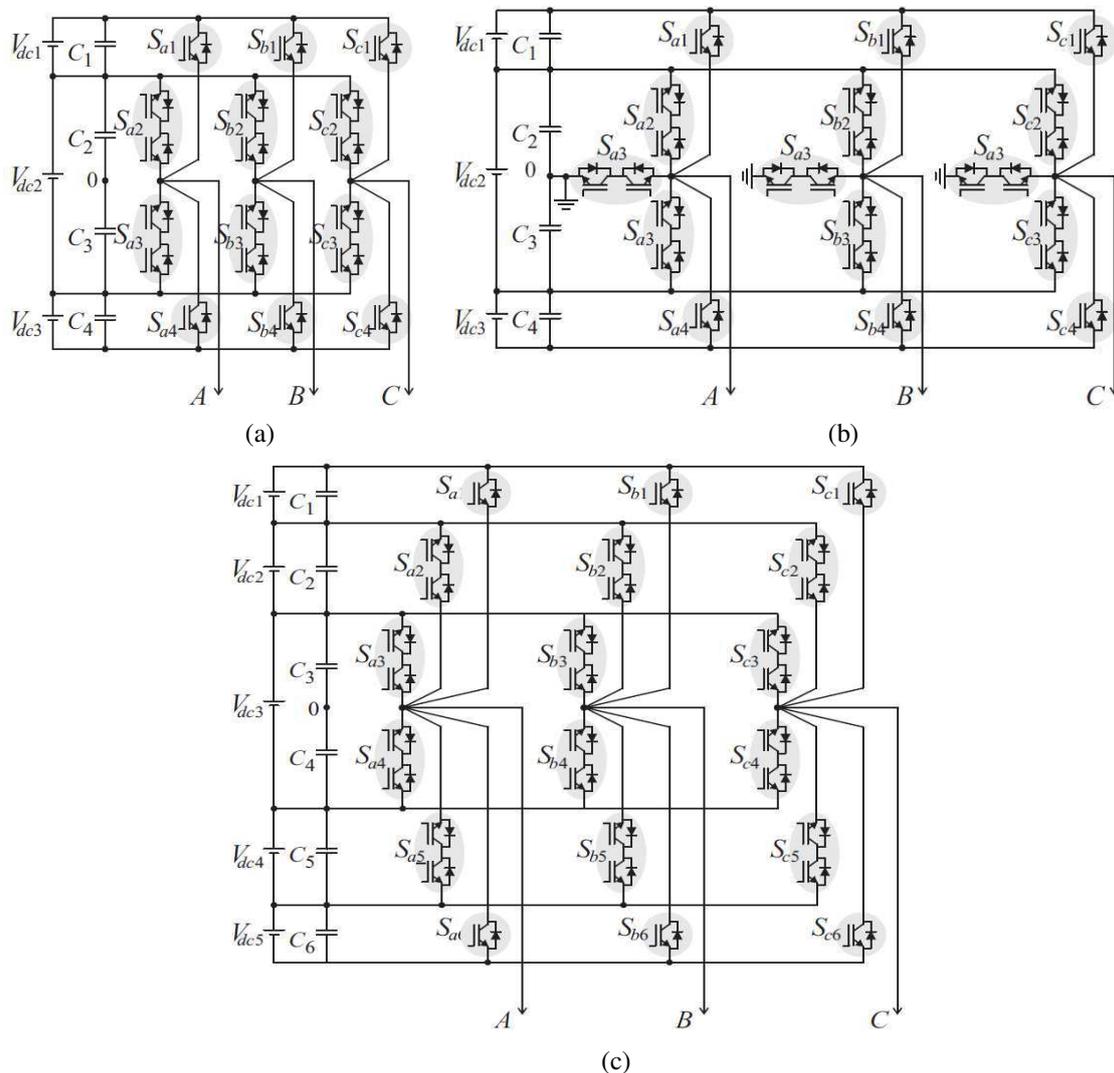


Figura 1: Configurações do conversor multinível aninhado com: (a) quatro níveis, (b) cinco níveis, (c) seis níveis.

Quando comparado às topologias NPC, as configurações aninhadas são uma interessante opção quando se queira trabalhar com um número de níveis igual ou superior a quatro [2]. Isto pode ser explicado pelo fato de que quanto maior o número de níveis menor será o emprego de diodos neste conversor.

Para o conversor aninhado, cada braço desta topologia é composta por duas chaves controladas (S_{x1} e S_{x4}) e duas chaves bidirecionais controladas (S_{x2} e S_{x3}), com $x = a, b$ ou c . Na Tabela 1 estão as tensões de polo v_{x0} como função do estado de chaveamento.

Tabela 1: Tensões de pólo como função dos estados de chaveamento.

v_{x0}	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}
$V_{dc1} + \frac{V_{dc2}}{2}$	1	0	0	0
$\frac{V_{dc2}}{2}$	0	1	0	0
$-\frac{V_{dc2}}{2}$	0	0	1	0
$-V_{dc3} - \frac{V_{dc2}}{2}$	0	0	0	1

É possível perceber a partir da Tabela 1 que para cada estado de chaveamento apenas uma chave é ativada por vez, isto ocorre para evitar curto circuito no braço.

Para garantir uma tensão de saída simétrica, as tensões de entrada escolhidas são tais que:

$$V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V \quad (1)$$

Na Figura 2, está o fluxo de corrente percorrido, para correntes positivas e negativas, quando as chaves S_{x1} , S_{x2} , S_{x3} e S_{x4} são ligadas, respectivamente. As chaves bidirecionais S_{x2} e S_{x3} foram empregadas no braço interno enquanto que as chaves S_{x1} e S_{x4} foram empregadas no braço mais externo.

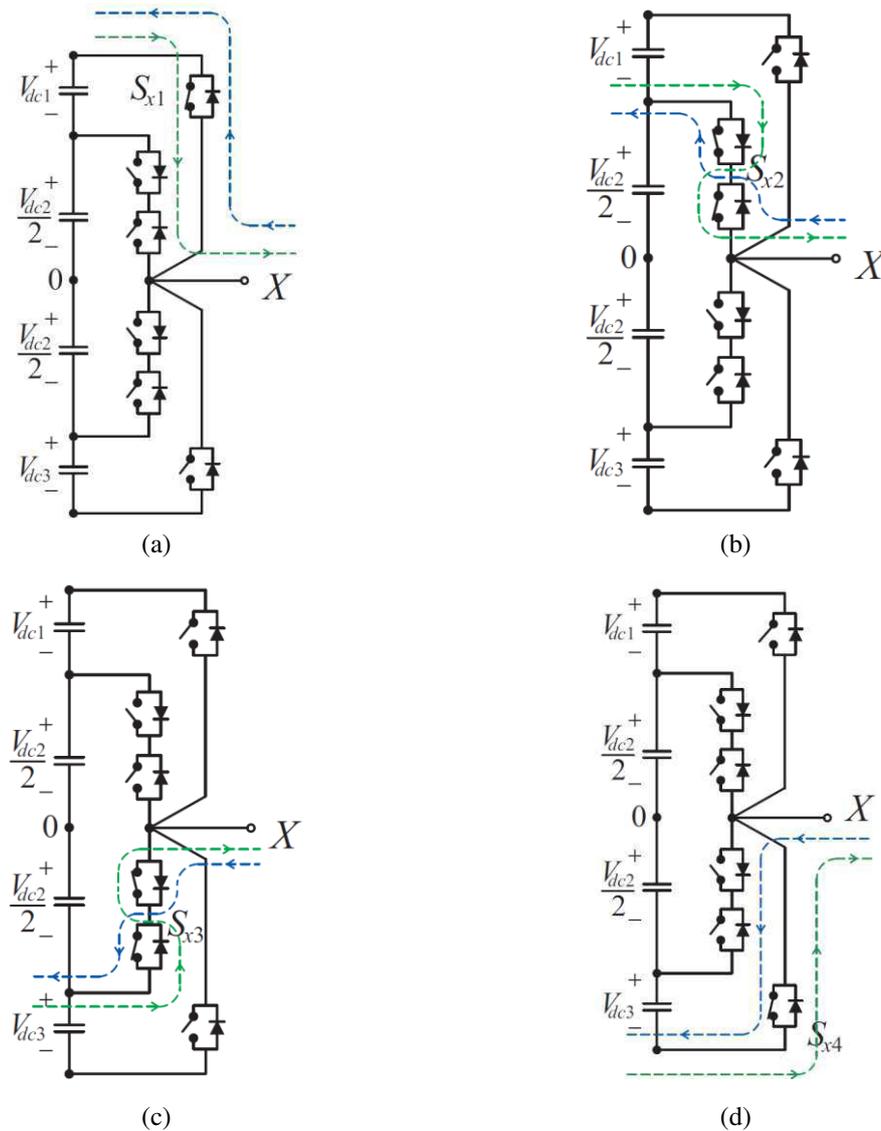


Figura 2: Sentidos da corrente para cada estado de chaveamento visto na Tabela 1.

Entendido os princípios básicos do seu funcionamento, é necessário escolher uma estratégia de modulação de acordo com os estados de chaveamento mostrados na Tabela 1. A estratégia escolhida é explicada em uma seção mais adiante (Atividade 1) que trata das atividades realizadas para cada tipo de conversor.

1.3.2 CONVERSOR *BACK-TO-BACK* TIPO NPC.

Por meio de uma junção do retificador e do inversor de três níveis tipo NPC, é obtida uma estrutura chamada *back-to-back*. Dentre as vantagens deste tipo de conversor podem-se citar:

- Fluxo de potência bidirecional;
- Baixa distorção harmônica (THD);
- Alto fator de potência;
- Controle de tensão do barramento CC.

Este tipo de conversor tem características importantes para aplicações envolvendo sistemas de alta potência, como em fontes de energia renováveis. Com este tipo de conversor ocorre uma minimização das indesejáveis interações dinâmicas entre a rede e o gerador eólico.

Nos conversores *back-to-back* especificamente do tipo NPC, tanto o lado retificador quanto o lado inversor contribuem para as correntes do ponto central do barramento CC. Estas correntes definem ondulações e o equilíbrio das tensões nesses capacitores. Deste modo, para o correto funcionamento do conversor, é necessário que os capacitores estejam balanceados. Algumas técnicas de controle têm sido desenvolvidas neste sentido para a obtenção do máximo desempenho do conversor. Em [3] é proposto um controle de potência direto com a modulação espaço-vetorial (DPC-SVM) para o retificador. Para o inversor é utilizado um controle orientado de campo (FOC). Além disso, é introduzida uma realimentação do inversor para o lado retificador. Com esta técnica de controle é possível perceber a partir dos resultados experimentais, que as flutuações das tensões dos capacitores do barramento CC são menores, o que contribui para a redução no seu tamanho. A técnica de modulação vetorial permite estabelecer uma relação entre o balanceamento das tensões nos capacitores e as distorções harmônicas nas tensões de saída. Desta forma, é criado um grau de liberdade para operar com baixos índices de distorção harmônica (THD) minimizando o desbalanceamento das tensões nos capacitores. A redução no número de chaves desta estrutura é uma solução alternativa para redução dos custos de implementação. Alguns trabalhos foram propostos neste sentido de redução no número de chaves [4]. Na atividade realizada durante o estágio, foi implementado experimentalmente um conversor *back-to-back* tipo NPC com um braço compartilhado entre dois lados, como pode ser visualizado na Figura 3, logo mais adiante.

Na Figura 3 está o sistema *back-to-back* estudado durante a segunda sequencia de atividades do estágio.

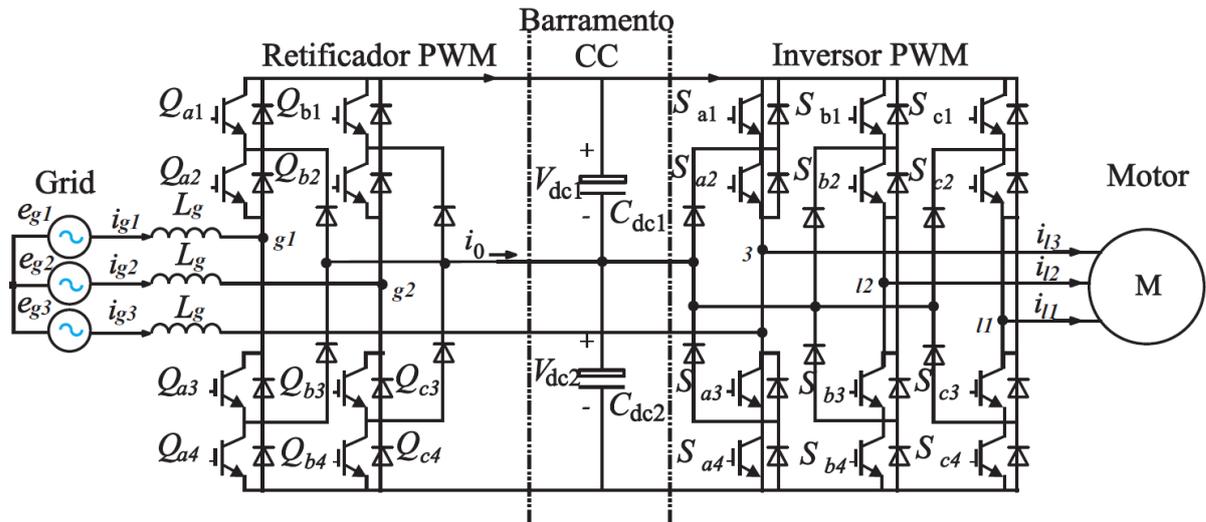


Figura 3: Conversor *back-to-back* de três níveis com cinco braços.

O retificador é constituído das chaves Q_{x1} , Q_{x2} , Q_{x3} e Q_{x4} , e o inversor é constituído das chaves S_{x1} , S_{x2} , S_{x3} e S_{x4} , onde x representa a fase (*a*, *b* ou *c*).

A Figura 4 ilustra o modelo do circuito equivalente genérico onde é possível ver os sentidos das correntes e as tensões presentes na topologia.

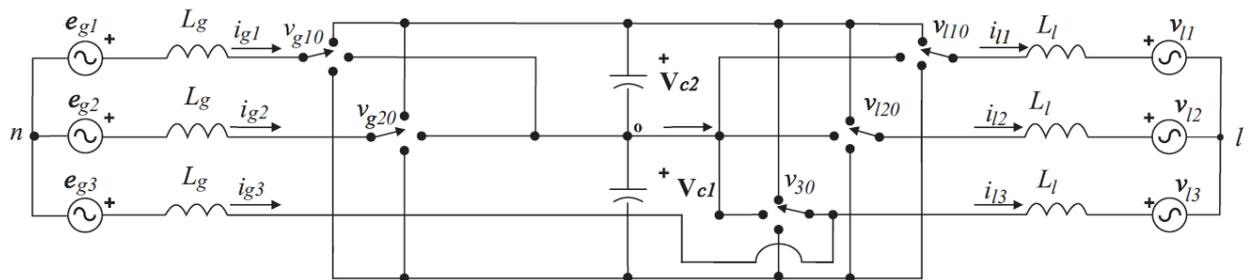


Figura 4: Circuito equivalente genérico de um conversor *back to back* de três níveis com cinco braços.

As estratégias de controle e modulação serão discutidas na seção posterior referente a este conversor (Atividade 2).

1.3.3 CONVERSOR MULTINÍVEL EM CASCATA (*CASCATED FULL BRIDGE CONVERTER*).

Os inversores multinível em cascata são uma das topologias mais utilizadas em sistemas de alta potência e média tensão. São formados por múltiplas células ponte H monofásicas e conectadas em série de modo a determinar o número de níveis de tensão requerido. A grande vantagem desta topologia é a modularidade, que proporciona a flexibilidade para aumentar o número de níveis sem acrescentar complexidade. Comparado ao NPC, este conversor necessita do mesmo número de chaves, mas tem a vantagem de não necessitar dos diodos de grampeamento. Por outro lado, são necessárias múltiplas células CC para o aumento do número de níveis. Na Figura 5 está representado um conversor de cinco níveis conectado em cascata.

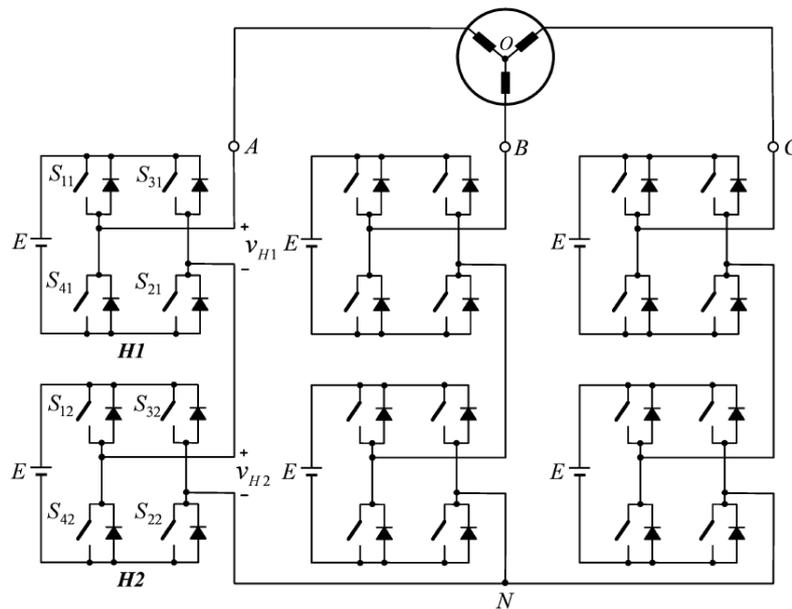


Figura 5: Conversor em cascata de cinco níveis

Neste conversor, cada fase consiste de duas pontes H com fontes DC isoladas uma da outra. As tensões de fase (V_{xN} com $x = a, b, c$) têm cinco níveis de tensão, e a seguir é descrito o seu princípio de funcionamento [5].

Quando as chaves S_{11}, S_{21}, S_{12} e S_{22} conduzem, a tensões de saída das células H_1 e H_2 , $v_{H1} = v_{H2} = E$ e a tensão de fase resultante na saída do inversor é $V_{AN} = v_{H1} + v_{H2} = 2E$. De modo similar, se as chaves S_{31}, S_{41}, S_{32} e S_{42} conduzem, então a tensão na saída do inversor é $V_{AN} = S_{x11} + v_{H2} = -2E$. Os outros níveis de tensão são: $-E, 0$ e E que correspondem aos vários estados de chaveamento descritos na Tabela 3.

Tabela 2: Tensões de fase e estados de chaveamento para o inversor de cinco níveis

V_{xN}	S_{x11}	S_{x31}	S_{x12}	S_{x32}	v_{H1}	v_{H2}
$2E$	1	0	1	0	E	E
E	1	0	1	1	E	0
	1	0	0	0	E	0
	1	1	1	0	0	E
	0	0	1	0	0	E
	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0
	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0
	1	0	0	1	E	$-E$
	0	1	1	0	$-E$	E
$-E$	0	1	1	1	$-E$	0
	0	1	0	0	$-E$	0
	1	1	0	1	0	$-E$
	0	0	0	1	0	$-E$
$-2E$	0	1	0	1	$-E$	$-E$

Da Tabela 3, é possível perceber que existem estados de chaveamento redundantes, ou seja, é possível atingir determinado nível de tensão por mais de um estado de chaveamento. Isto é uma característica comum aos conversores multinível e pode ser uma característica vantajosa com relação à flexibilidade da estratégia de modulação a ser utilizada. O número de níveis de tensão em um inversor Ponte H em cascata pode ser calculado a partir da expressão:

$$n = 2H + 1 \quad (2)$$

Onde H é o número de células e n é níveis da tensão de fase v_{xN} . Para um conversor multinível em cascata, n é sempre um número ímpar, enquanto para outros conversores multinível, como o NPC (*Neutral Point Clamped*) n pode ser par ou ímpar. O número de chaves ativas em um conversor em cascata é igual a:

$$N_{sw} = 6(n - 1) \quad (3)$$

Então, para o conversor de cinco níveis, $N_{sw} = 24$ chaves ativas.

O inversor introduzido acima pode ser estendido para qualquer outro nível de tensão. Na Figura 6 estão os circuitos representativos dos braços dos inversores de sete e nove níveis, respectivamente.

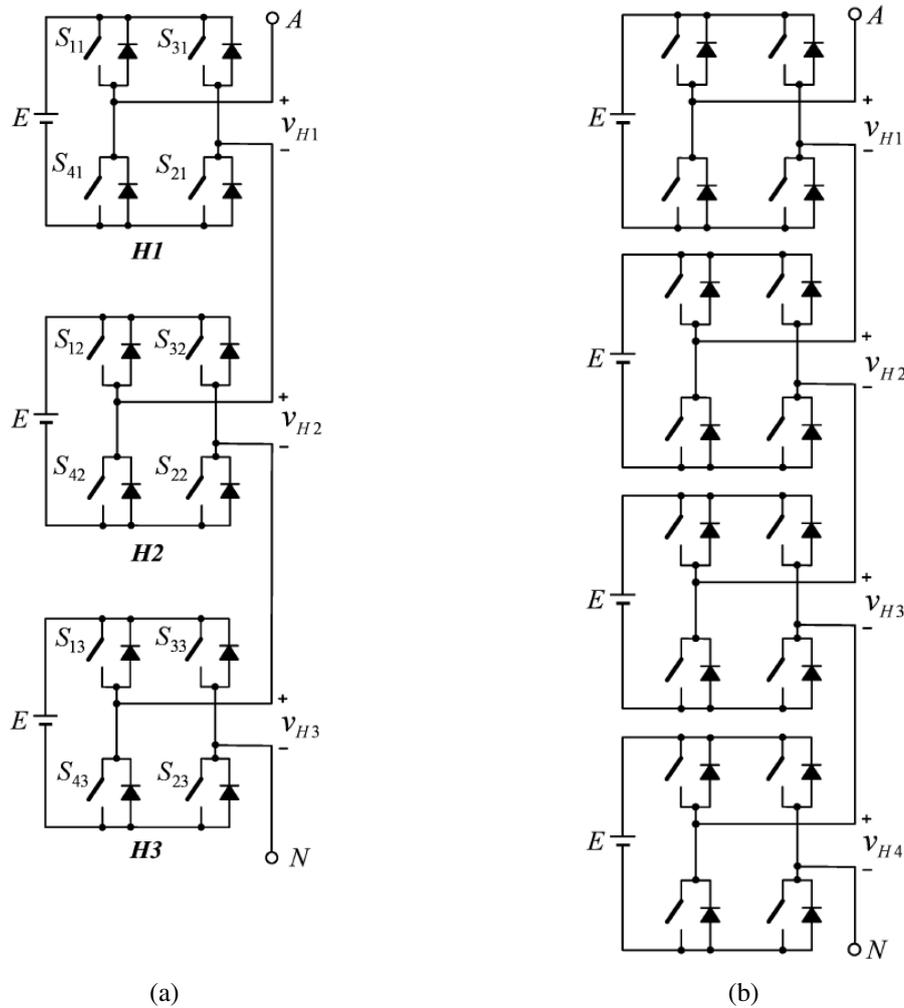


Figura 6: Inversor Multinível em Cascata de: (a) Sete níveis; (b) Nove níveis.

Na próxima etapa realizada referente ao Conversor Multinível em Cascata (Atividade 3), são analisadas as estratégias de modulação utilizadas para a obtenção dos resultados obtidos na última seção deste relatório.

2 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

No decorrer deste Capítulo são apresentadas as atividades desenvolvidas durante o período do Estágio Supervisionado no LEIAM. As atividades estão relacionadas aos conversores explicados no capítulo anterior. Para cada tipo de conversor será descrito o material empregado e os procedimentos utilizados para a obtenção dos resultados experimentais a partir de estratégias de modulação PWM.

2.1 ATIVIDADE 1.

A primeira atividade realizada está relacionada ao “Conversor Multinível Aninhado (*Nested Multilevel*)”.

Depois do entendimento teórico do funcionamento do conversor, foi estudada a estratégia de modulação para a operação experimental do conversor. Neste caso, os resultados experimentais obtidos são referidos ao conversor de quatro níveis. O arranjo experimental montado também é visto detalhadamente.

2.1.1 ESTRATÉGIA DE MODULAÇÃO PWM.

O controle das chaves no conversor aninhado foi implementado usando a estratégia PWM híbrida descrita nesta seção. No caso da estratégia de modulação híbrida, as tensões de referência são modificadas para garantir as mesmas vantagens da modulação vetorial com a simplicidade de implementação da modulação escalar [2]. Então as tensões de referência são modificadas da seguinte maneira:

$$\overline{v_a^*} = v_a^* + v_\mu^* \quad (4)$$

$$\overline{v_b^*} = v_b^* + v_\mu^* \quad (5)$$

$$\overline{v_c^*} = v_c^* + v_\mu^* \quad (6)$$

Onde v_μ^* é a componente homopolar ou componente de sequência zero. Estas equações não podem ser determinadas a menos que v_μ^* seja determinado. Para tanto, é utilizado um fator de proporção μ que varia entre zero e um e determina a característica de v_μ a partir da expressão:

$$v_\mu = \mu P_{min} - (1 - \mu) \left(\frac{E}{N - 1} - P_{max} \right) \quad (7)$$

Onde $P_{max} = \max[P]$, $P_{min} = \min[P]$, $P = \{P_a, P_b \text{ e } P_c\}$ e N é o número de níveis considerado no conversor. Neste caso será utilizado um $N = 4$. Os parâmetros P_a, P_b e P_c indicam as diferenças entre os níveis de tensão e as correspondentes tensões de referência senoidais em determinados instantes de modulação. Basta considerar os níveis como sendo eixos horizontais que limitam a região das tensões de referência em regiões. No caso considerado, as tensões de referência são limitadas por quatro níveis, com ilustrado na Figura 77.

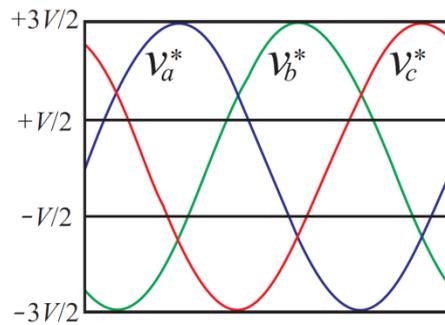


Figura 7: Regiões definidas pelos níveis de tensão e as tensões de referência para um conversor de quatro níveis.

O valor destes níveis pode ser determinado pela equação:

$$Eixo(k) = \left(\frac{1}{2} - \frac{k - 1}{N - 1} \right) V \quad (8)$$

Com $k = 1, \dots, 4$ verificado na Figura 7. Determinado os eixos considera-se:

$$se(Eixo(k)) > v^* > Eixo(k + 1), \text{ então } P_x = Eixo(k) - v^* \quad (9)$$

A partir deste algoritmo são determinado os tempos de condução das chaves como mostra a Equação (10):

$$T_j = \frac{P_x}{\frac{V}{N - 1}} T_s \text{ e } T_x = T_s - T_j \quad (10)$$

Com $j = 1, 2, 3$ e $x = a, b, c$.

2.1.2 MONTAGEM DO CONVERSOR ANINHADO.

Aqui está a montagem do conversor aninhado de quatro níveis montado no LEIAM. Na Fotografia da Figura 8 estão destacadas as partes principais do conversor.

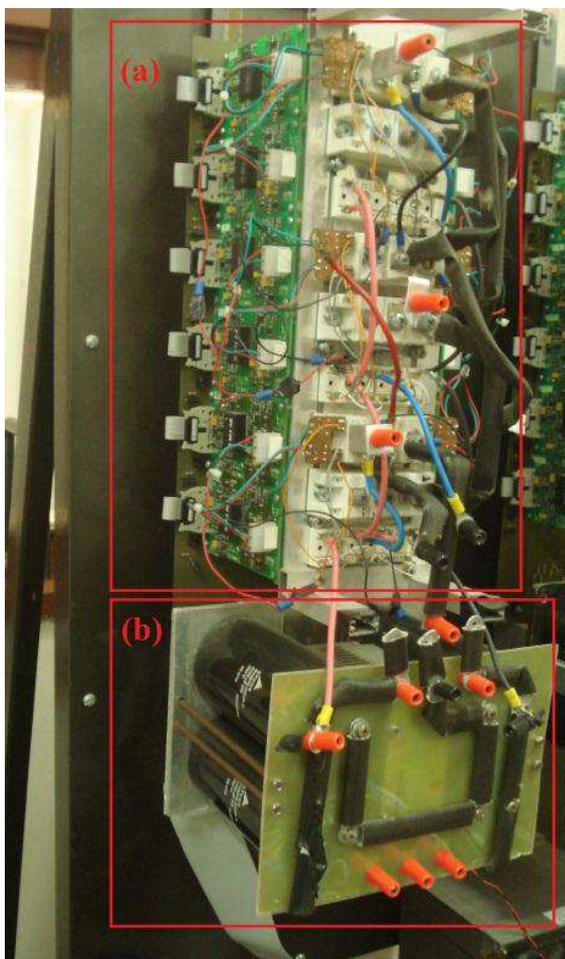


Figura 8: Foto do conversor aninhado de quatro níveis. (a) Arranjo dos braços no conversor aninhado (b) Estágio retificador e barramento cc.

2.2 ATIVIDADE 2.

Dando continuidade às atividades desenvolvidas durante o estágio, nesta seção é discutido o “Conversor *Back to Back* tipo NPC”.

Nesta etapa foi analisada a estratégia de modulação utilizada para o chaveamento dos conversores NPC com o braço compartilhado entre o estágio retificador e o estágio inversor. Após isto, é feita a discussão do arranjo experimental.

2.2.1 ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A tensão do capacitor é ajustada pra o valor de referencia usando o controlador PI (R_c). Na saída do controlador é definida a amplitude da corrente de referência (I_g^*) de entrada. O controlador de corrente R_g , que é um PI modificado, define as tensões de referência de entrada v_g^* . Não foi utilizado nenhum controle para as tensões na carga. Na Figura 9 está o diagrama de controle utilizado.

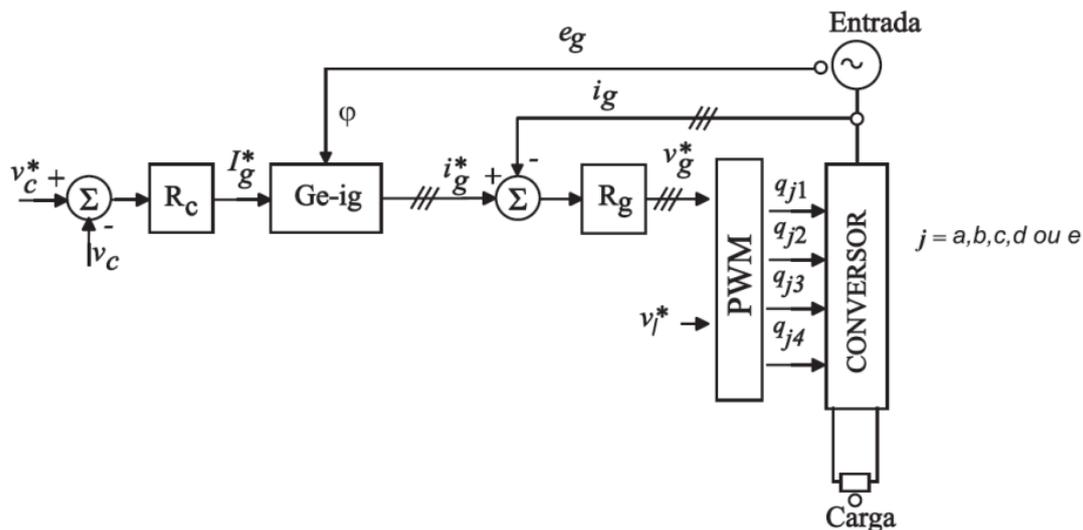


Figura 9: Diagrama de controle.

2.2.2 ESTRATÉGIA DE MODULAÇÃO PWM

Nesta topologia também foi utilizada a técnica de modulação PWM híbrida descrita na seção anterior relativa ao conversor aninhado. Entretanto, como esta estrutura utiliza um braço compartilhado, além das tensões de referência definidas anteriormente é definida uma tensão auxiliar para V_{gl} , que será acrescentada nas tensões de saída. Considerando as tensões de fase iguais a:

$$v_a^* = V \cdot \sin(\omega t) \quad (11)$$

$$v_b^* = V \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (12)$$

$$v_c^* = V \cdot \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (13)$$

Então o sistema acrescido da tensão auxiliar V_{gl} fica:

$$v_{gl}^* = v_{gc}^* + v_c^* \quad (14)$$

$$v_a = v_a^* + v_{gl}^* \quad (15)$$

$$v_b = v_b^* + v_{gl}^* \quad (16)$$

Como o conversor considerado tem três níveis, então da Equação (8) os eixos considerados são:

$$eixo[1] = \frac{E}{2} \quad (17)$$

$$eixo[2] = 0 \quad (18)$$

$$eixo[3] = -\frac{E}{2} \quad (19)$$

Utilizando o algoritmo da Equação (9) são determinados os $P_{max} = \max[P]$ e $P_{min} = \min[P]$, $P = \{P_a, P_b, P_c, P_d \text{ e } P_e\}$.

Determinado os valores máximos e mínimos de P_x , a partir da Equação (7), é calculada a tensão de sequencia zero v_μ que será somada às cinco tensões de referência.

De posse das novas tensões de referência, os intervalos de condução das chaves são determinados, para um período de modulação, partir da Equação (10).

2.2.3 CONTROLE DAS TENSÕES DOS CAPACITORES NO BARRAMENTO CC

Para um correto funcionamento dos conversores e três níveis, é necessário que as tensões sobre os capacitores do barramento CC estejam balanceadas.

Para este controle ser possível, foi proposto uma modificação do *on-off* proposto em [6]. Na Figura 10 é possível verificar o diagrama proposto.

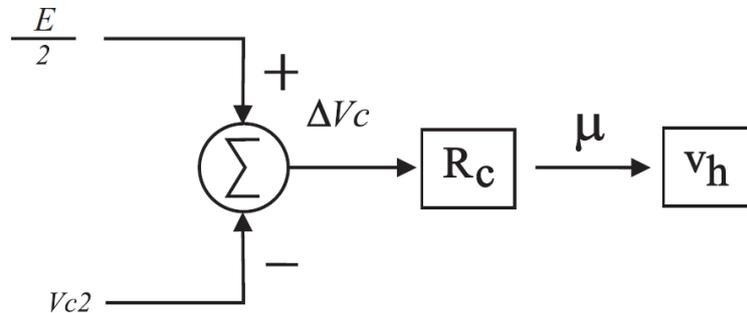


Figura 10: Diagrama de controle proposto.

Como houve uma modificação no controle, adotou-se uma inserção de um controlador PI, onde o valor de μ muda a partir do sinal erro resultante entre o valor de referência para a tensão no ponto central do barramento CC e o seu valor medido, determinando qual capacitor deve ser carregado ou descarregado no próximo período de modulação. Assim o valor de μ é variado de modo a modificar a modulação e manter as tensões equilibradas.

2.2.4 MONTAGEM DO CONVERSOR NPC DE TRÊS NÍVEIS BACK-TO BACK

A montagem do Conversor NPC back to back de três níveis foi desenvolvida por um aluno de doutorado do LEIAM. A Figura 11 é uma fotografia do circuito montado. Na Figura 11 o arranjo é simétrico, ou seja, a parte destacada no lado esquerdo é similar ao do lado esquerdo que não tem destaque. Nesta atividade foram identificados todos os componentes do material, sendo destacados nas fotografias que se seguem.

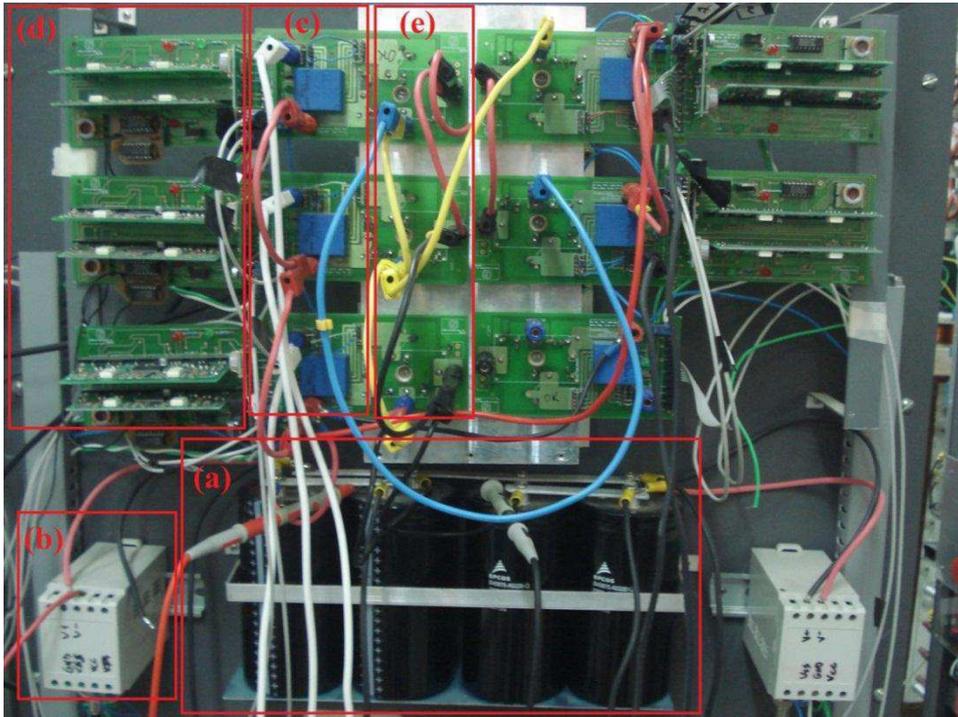


Figura 11: Foto do conversor *back to back* tipo NPC de três níveis; (a) Capacitores do barramento CC; (b) Sensor de tensão; (c) Sensores de corrente; (d) Drivers (e) IGBTs.

Por questões de segurança foi projetado o circuito de proteção ilustrado na Figura 12 a seguir.

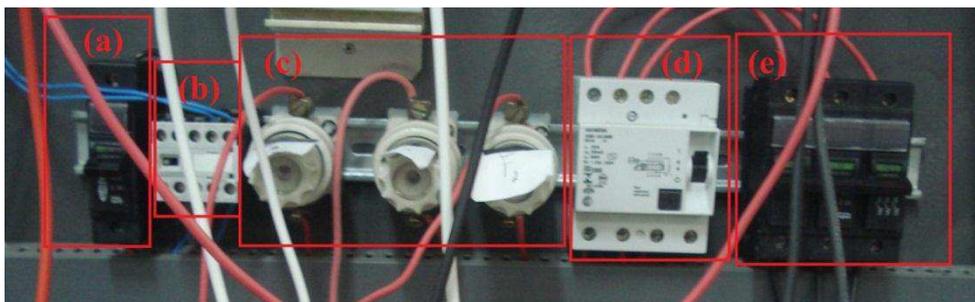


Figura 12: Foto do circuito de proteção projetado. (a) Disjuntor monofásico; (b) Relé de proteção dos *drivers*; (c) Fusíveis; (d) Relé trifásico; (e) Disjuntor trifásico.

As fontes de alimentação dos *drivers* e sensores estão na Figura 13.

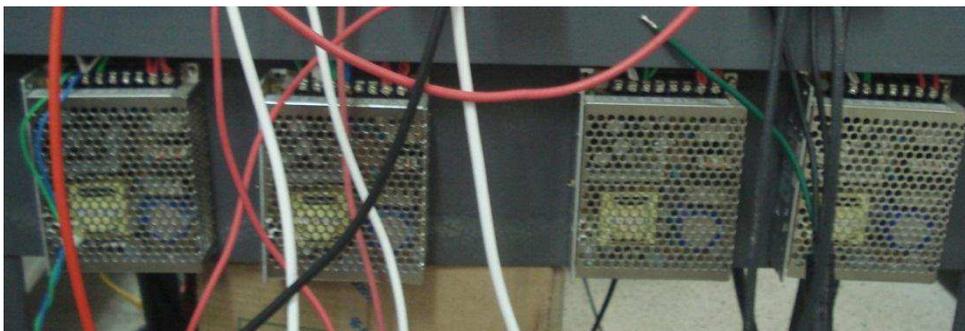


Figura 13: Foto das fontes chaveadas de 15V para alimentação dos drivers e dos sensores de corrente e tensão.

2.3 ATIVIDADE 3.

Na ultima etapa do estágio, aqui é discutido o Conversor Multinível em Cascata (*Cascated Full Bridge Converter*). Depois de analisadas as estratégias de modulação são discutidas a montagem realizada para a obtenção dos resultados experimentais.

2.3.1 ESTRATÉGIA DE MODULAÇÃO PWM.

Para conversores multinível conectados em cascata podem ser utilizados dois esquemas de modulação baseadas na posição das portadoras: deslocadas em fase e deslocadas em nível [5]. A seguir estão comentados os dois tipos de modulação.

2.3.2 MODULAÇÃO COM PORTADORAS DESLOCADAS EM FASE.

Em geral, para gerar n níveis na tensão de saída em um conversor multinível são necessárias $n-1$ portadoras. Isto é aplicado neste esquema de modulação e as portadoras têm a mesma amplitude e frequência, mas deslocadas em fase. A defasagem ϕ entre uma portadora e outra é igual a:

$$\phi = \frac{360^\circ}{n - 1} \quad (20)$$

O sinal modulante geralmente é uma onda senoidal trifásica com amplitude e frequência ajustáveis de acordo com os índices de modulação em amplitude e frequência, respectivamente. Na Figura 14 estão as portadoras defasadas de 60° e o sinal modulante correspondente a fase “a”. Esta configuração é feita para um conversor de sete níveis.

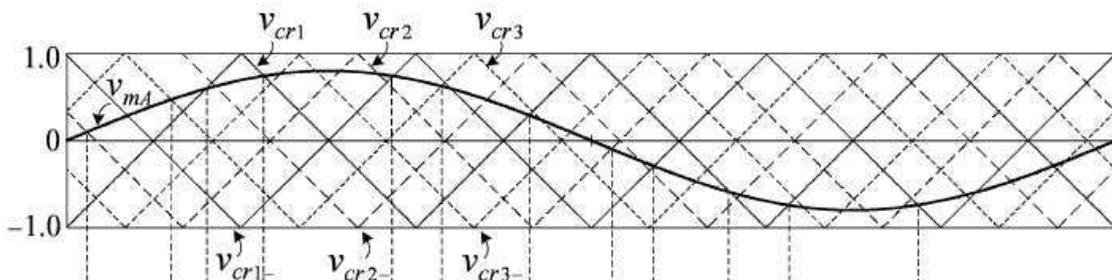


Figura 14: Portadoras e sinal modulante da fase “a” para modulação com portadoras deslocadas em fase do conversor em cascata de sete níveis.

O esquema de modulação PWM discutido acima é essencialmente unipolar, ou seja, os sinais de gatilho das chaves S_{a31} e S_{a31} em H_1 são geradas pela comparação de v_{cr1} e v_{cr1-} com v_{mA} respectivamente. Então a tensão de saída é chaveada entre 0 e $+E$ durante o semiciclo positivo e entre 0 e $-E$ durante o semiciclo negativo. A Figura 15 contém os sinais de gatilho das chaves S_{a11} e S_{a31} e a tensão v_{H1} na saída da célula H_1 , de acordo com o que foi explicado.

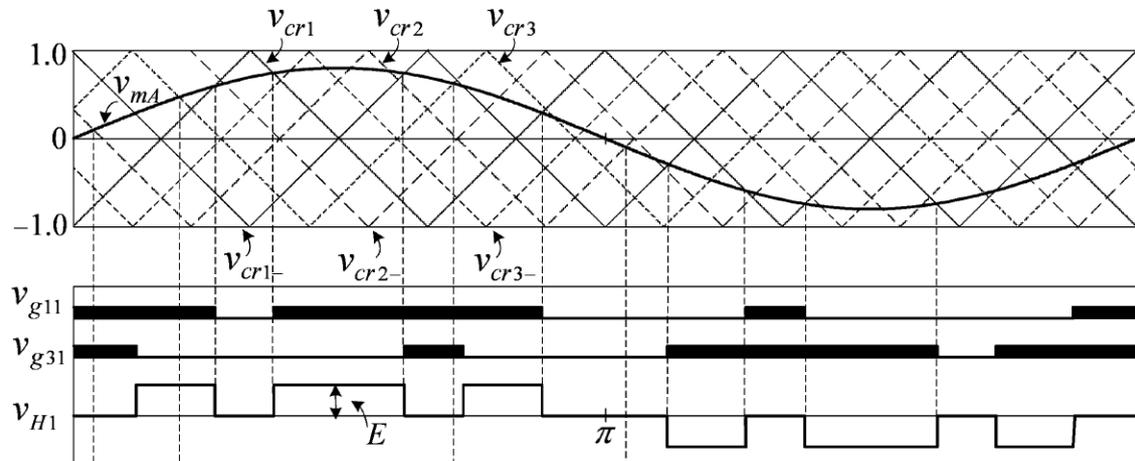


Figura 15: Sinais de gatilho e tensão na saída da célula H_1 para conversor de sete níveis com portadoras deslocadas em fase.

A tensão de fase v_{AN} pode ser determinada por:

$$v_{AN} = v_{H1} + v_{H2} + v_{H3} \quad (21)$$

Onde v_{H1} , v_{H2} e v_{H3} são as tensões de saída das células H_1 , H_2 e H_3 respectivamente. Para este conversor de sete níveis, a forma de onda das tensões de fase é formada pelos níveis: $3E$, $2E$, E , 0 , $-E$, $-2E$ e $3E$.

2.3.3 MODULAÇÃO COM PORTADORAS DESLOCADAS EM NÍVEL.

Similarmente ao esquema anterior, nesta estratégia também são necessárias $n-1$ portadoras para geração de n níveis de tensão, todas com a mesma frequência e amplitude. No caso considerado, para um conversor de cinco níveis, todas as portadoras estão na mesma disposição de fase, como mostra a Figura 16.

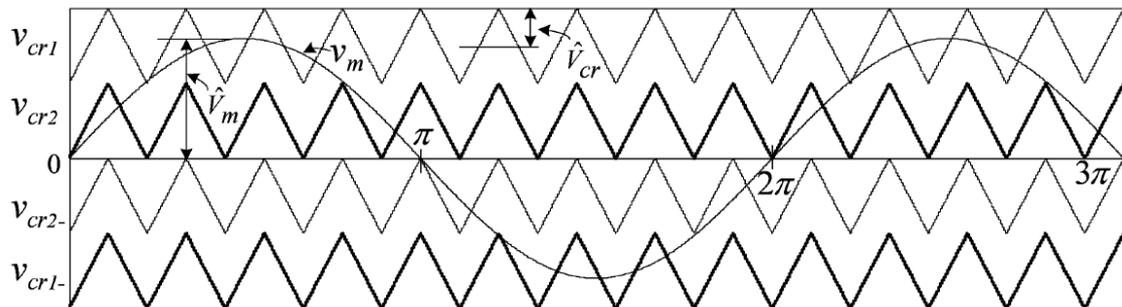


Figura 16: Modulante e portadoras deslocadas em nível e com a mesma disposição de fase para um conversor de cinco níveis.

No caso de um inversor de sete níveis, o procedimento de modulação é o mesmo, entretanto, são necessárias seis portadoras. A Figura 17 identifica as portadoras deslocadas, a modulante da fase “a” e os sinais de gatilho para a célula H_1 . para um inversor de sete níveis.

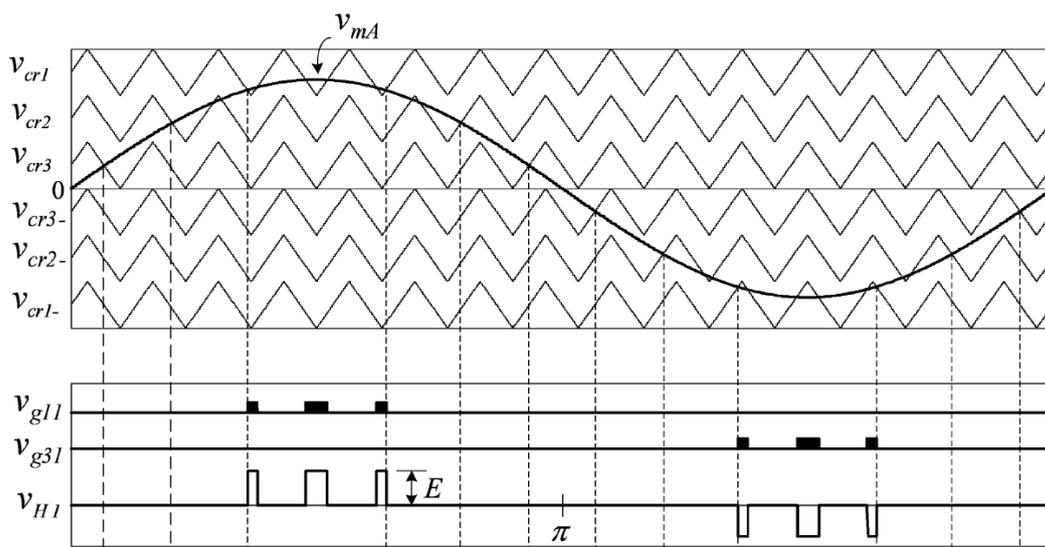


Figura 17: Sinais de gatilho e tensão na saída da célula H_1 para conversor de sete níveis com portadoras deslocadas em nível.

Nesta estratégia de modulação, as portadoras v_{cr1} e v_{cr1-} são usadas para gerar os gatilhos das chaves S_{a11} e S_{a31} em H_1 . Por outro lado, as portadoras v_{cr2} e v_{cr2-} são usadas para gerar os gatilhos correspondentes às chaves S_{a12} e S_{a32} em H_2 e as

portadoras v_{cr3} e v_{cr3-} são comparadas com a modulante para gerar os gatilhos correspondentes às chaves S_{a13} e S_{a33} em H_3 .

Novamente a tensão de fase v_{AN} pode ser determinada pela Equação (21), onde v_{H1} , v_{H2} e v_{H3} são as tensões de saída das células H_1 , H_2 e H_3 respectivamente. Para este conversor de sete níveis, a forma de onda das tensões de fase é formada pelos níveis: $3E, 2E, E, 0, -E, -2E$ e $3E$.

2.3.4 MONTAGEM DO CONVERSOR MULTINÍVEL EM CASCATA.

Nesta seção é visto o procedimento da bancada didática construída para um conversor multinível em cascata de até onze níveis. A Figura 18 ilustra o layout da bancada em três vistas: a frontal, interna e a lateral.

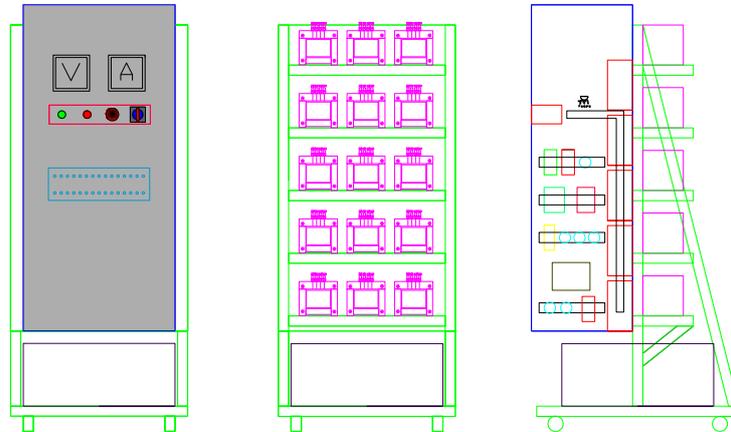


Figura 18: Projeto da bancada experimental de um inversor multinível de onze níveis.

Na Figura 19 está a fotografia frontal da bancada experimental após sua montagem, com destaque em vermelho da célula em ponte H.



Figura 19: Foto da bancada experimental de um inversor de até onze níveis.

É possível perceber que há cinco células ponte H para cada fase do inversor, ou seja, a partir da Equação (2), o número de níveis da tensão de fase é:

$$n = 2.H + 1 = 2 \times 5 + 1 = 11 \text{ níveis}$$

Por outro lado, como visto na teoria da seção anterior, uma das vantagens desta estrutura é a modularidade, ou seja, é possível a reconfiguração do inversor para trabalhar com três, cinco, sete, nove ou onze níveis de tensão. Para isto, basta fazer as devidas ligações com as células ponte H correspondentes a estes níveis, segundo o número de células determinadas a partir da Equação (2). Na Figura 20 está representado o *layout* do diagrama elétrico do inversor na configuração de onze níveis.

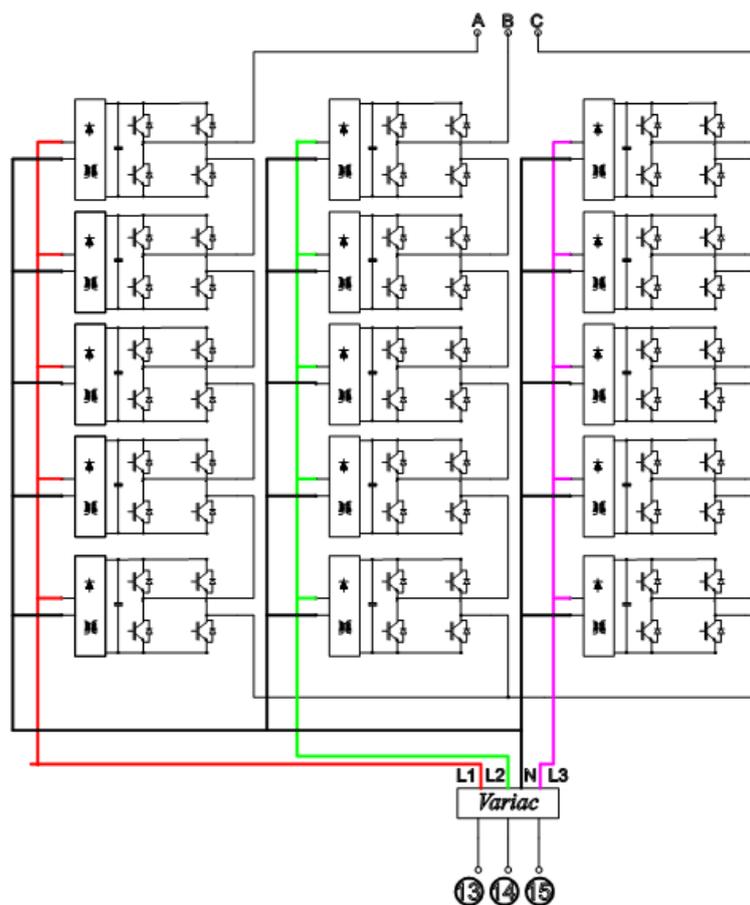


Figura 20: Layout do inversor na configuração de onze níveis.

É possível perceber na Figura 20 que as fontes DC na entrada de cada célula em Ponte H são geradas por circuitos retificadores com capacitores na saída.

Assim como na montagem do conversor *back to back*, por motivos de segurança é necessário um circuito de proteção para este conversor. Na Figura 21 está em destaque, o circuito de proteção montado na parte de trás da bancada didática.

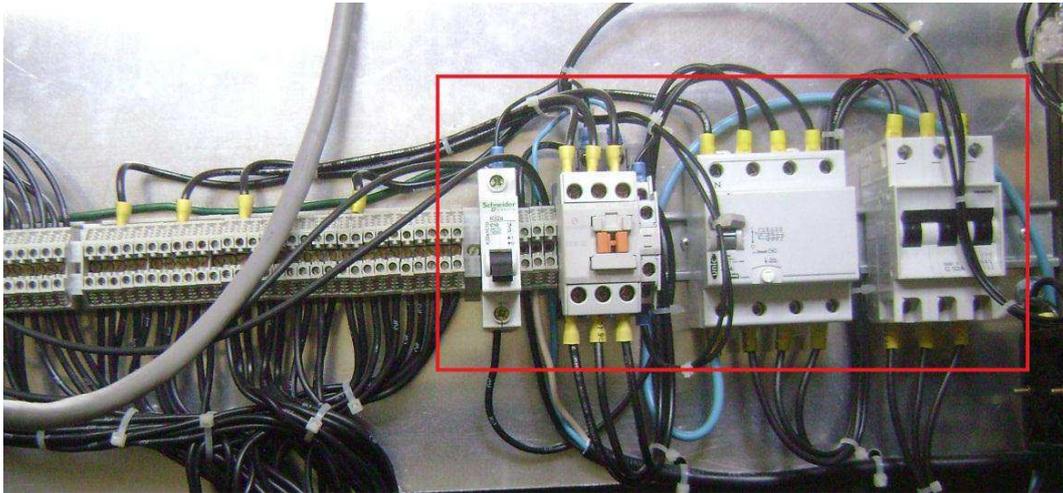


Figura 21: Foto do circuito de proteção do conversor.

Esse circuito é projetado para suportar correntes de até 25A sendo utilizados cabos de 2,5 mm de bitola.

Além do circuito descrito na Figura 21, um circuito auxiliar para energização individual das células inversoras foi desenvolvido como mostra a imagem da Figura 22.

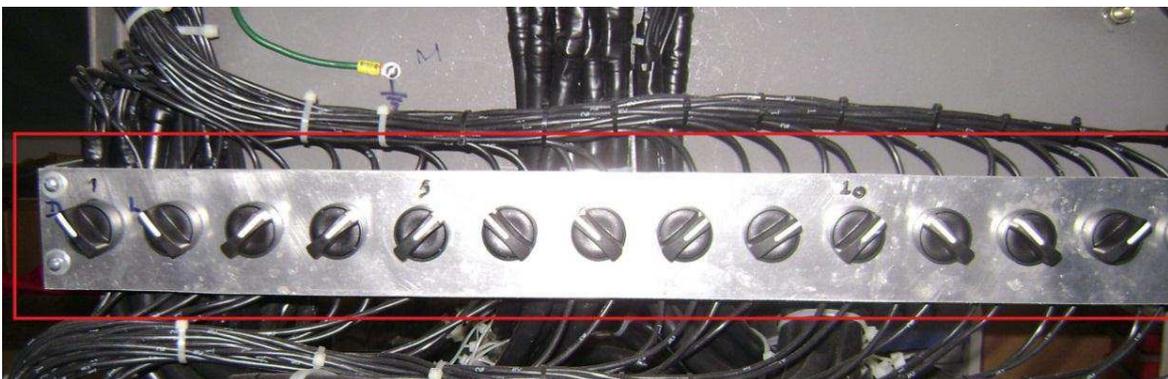


Figura 22: Foto do circuito *on/off* para acionamento individual das células em ponte H.

Por outro lado, o comando das chaves é realizado por um circuito específico cuja saída está conectada às chaves através de conectores *RJ15* (*Cabo de rede*) como mostra a fotografia da Figura 23. O código de controle das chaves é realizado no *software Matlab/Simulink* e os sinais de gatilho gerados no *dSPACE* são transmitidos através do conector *DB25* (*porta paralela*) ao circuito de interface destacado na Figura 23.

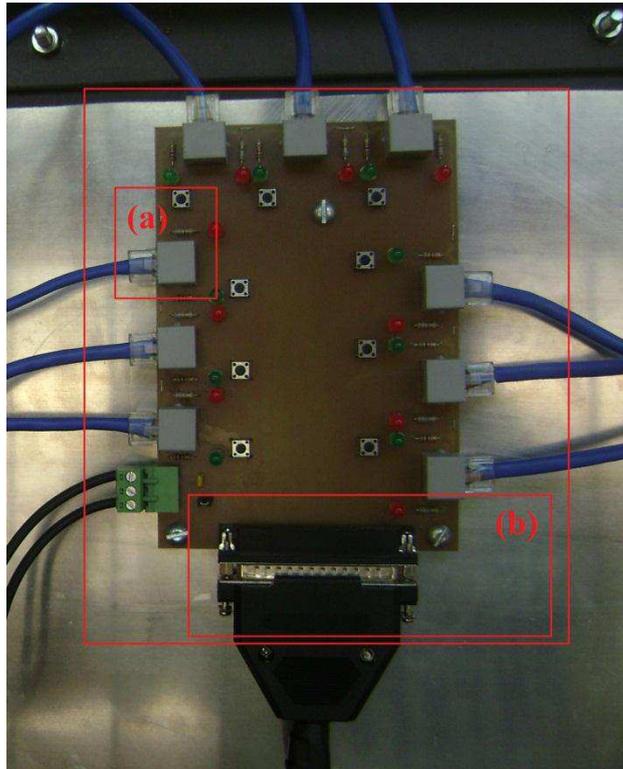


Figura 23: Foto da interface do circuito de comando. (a) Conector RJ15; (b) Conector DB25.

O controle implementado no Matlab, foi realizado através do dSPACE, um simulador em tempo real mostrado na Figura 24.



Figura 24: Foto do simulador dSPACE utilizado para gerar os sinais de chaveamento a partir da modulação específica.

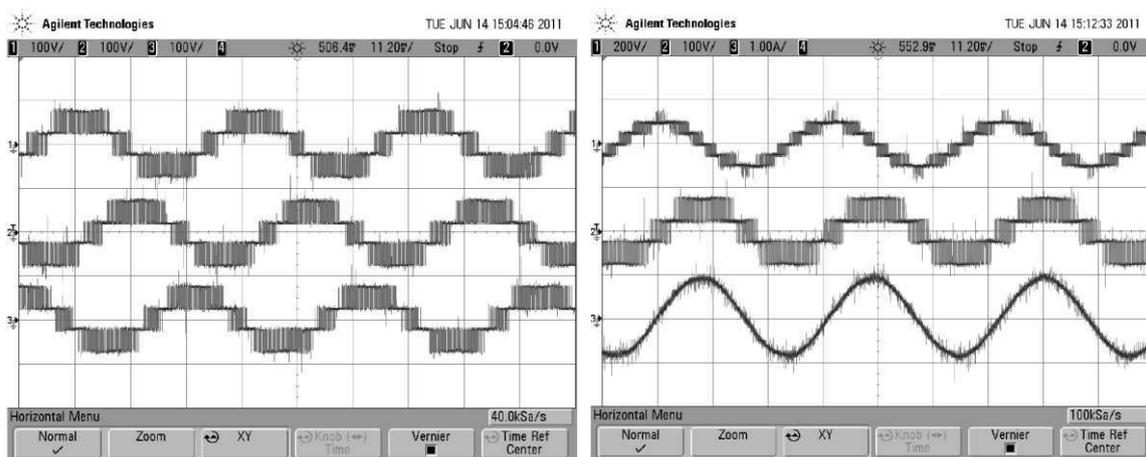
Na próxima seção relativa a este conversor, serão analisados os resultados obtidos para dois modos de funcionamento do conversor em cascata para os conversores de cinco e sete níveis.

3 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são discutidos os resultados experimentais obtidos a partir das montagens realizadas para os três tipos de conversores.

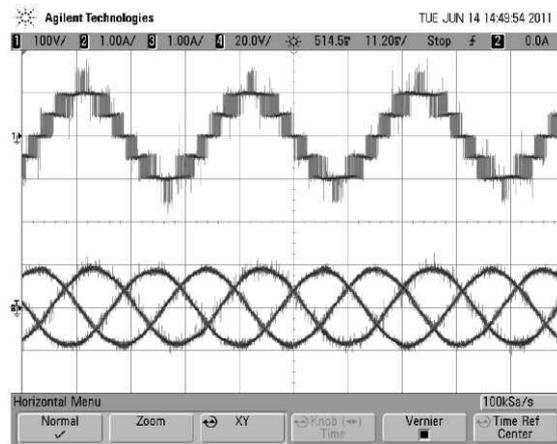
3.1 ATIVIDADE 1.

De modo a validar a configuração do conversor aninhado de quatro níveis, foram retirados resultados experimentais da topologia específica. Para controle das chaves foi utilizado o DSP TMS320F28335 programado com a técnica de modulação híbrida descrita na seção 2.1. Para tanto, foi utilizada uma carga trifásica indutiva conectada em Y na saída do conversor com $R = 65\Omega$ e $L = 7mH$. Para geração do barramento CC foram conectadas três fontes DC de 50V e quatro capacitores de $2200\mu F$. O arranjo é o que está indicado na Figura 1(a). A Figura 25 mostra os resultados obtidos para o conversor aninhado de quatro níveis.



(a)

(b)



(c)

Figura 25: Resultados experimentais para a configuração aninhada com quatro níveis. (a) tensões de polo; (b) De cima para baixo: tensão de linha na saída, tensão de polo e corrente de fase. (c) De cima para baixo: tensão de linha na saída e corrente trifásica na carga.

A partir dos resultados obtidos é possível perceber nas tensões de polo os quatro níveis previstos na teoria e as correntes de linha mais senoidais devido ao caráter indutivo da carga. Os resultados são semelhantes à topologia NPC de quatro níveis, mas ao contrário desta, o número de diodos é reduzido o que contribui para uma maior eficiência do circuito. Além disso, foi possível aplicar uma estratégia de modulação generalizada ao conversor aninhado.

3.2 ATIVIDADE 2.

Para o conversor de três níveis *back-to-back* tipo NPC, para a carga foi utilizado um motor de indução (ref.: $\cos\theta = 0,76$; $f = 60\text{Hz}$; 2cv ; $1,5\text{kW}$) e variando a frequência de chaveamento para alguns valores, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 26. Foi considerado uma tensão do barramento CC de 120V .

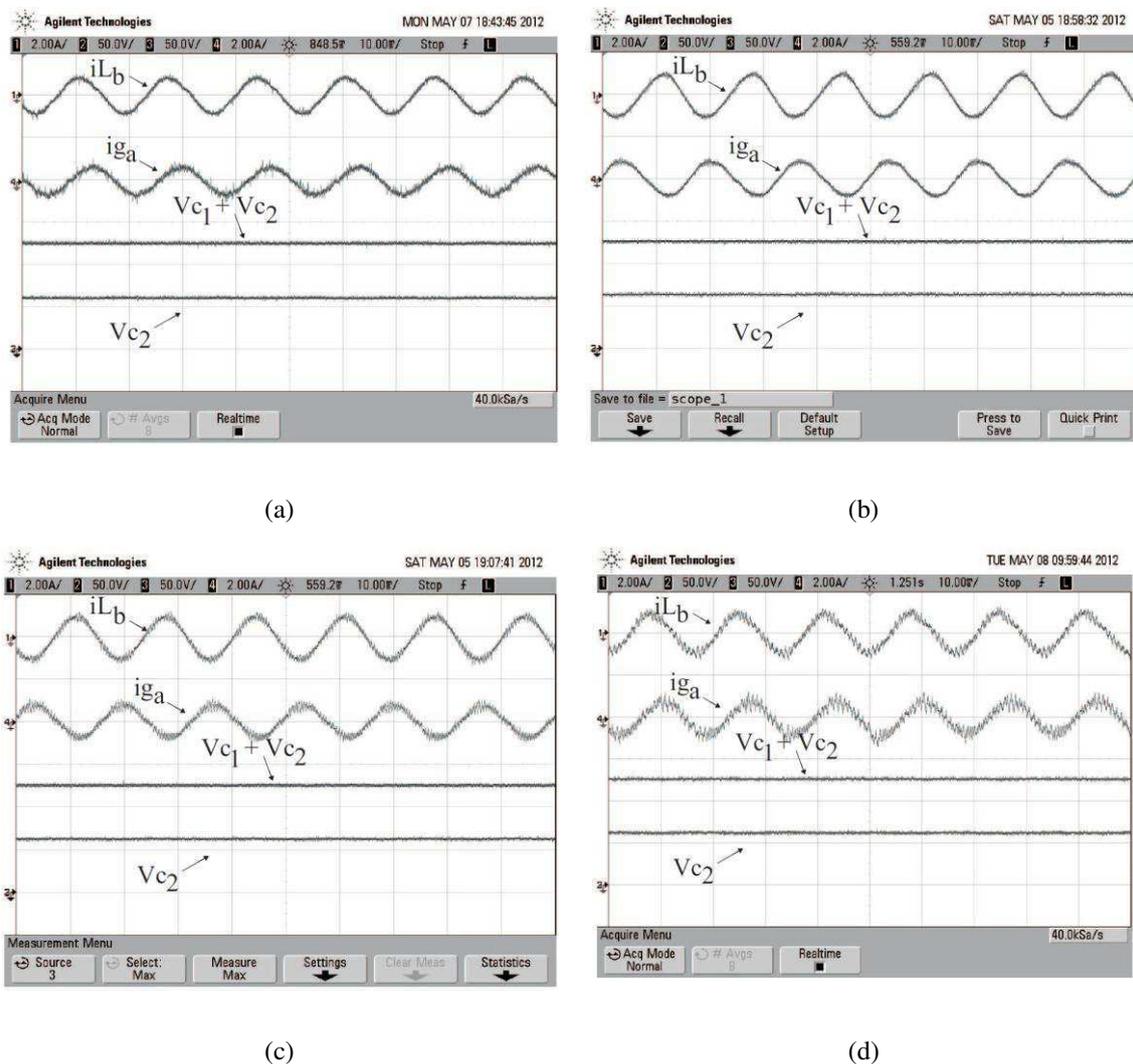


Figura 26: De cima para baixo: Corrente de entrada para a fase a; Corrente no motor para a fase b; Tensões nos capacitores do barramento CC. Considerando as seguintes frequências de chaveamento: (a) 10kHz ; (b) 5kHz ; (c) 2kHz ; (d) 1.19kHz .

Os resultados obtidos demonstram que a técnica da modulação híbrida adaptada para o conversor *back-to-back* tipo NPC com um braço compartilhado foi satisfatória. Além disso, foi realizado o balanceamento das tensões nos capacitores para frequências de chaveamento mais baixas.

3.3 ATIVIDADE 3.

Para o Conversor Multinível em Cascata (*Cascated Full Bridge Converter*), os resultados foram aqui obtidos para os dois tipos de modulação apresentados na seção anterior com os dois tipos de conversores multinível: de cinco níveis e sete níveis.

Foi considerada uma frequência de chaveamento $f_s = 720\text{Hz}$ e uma carga indutiva conectada em Y com uma potência de entrada igual a 40W.

Na Figura 27 estão os resultados obtidos com as duas estratégias de modulação consideradas para um conversor de cinco níveis.

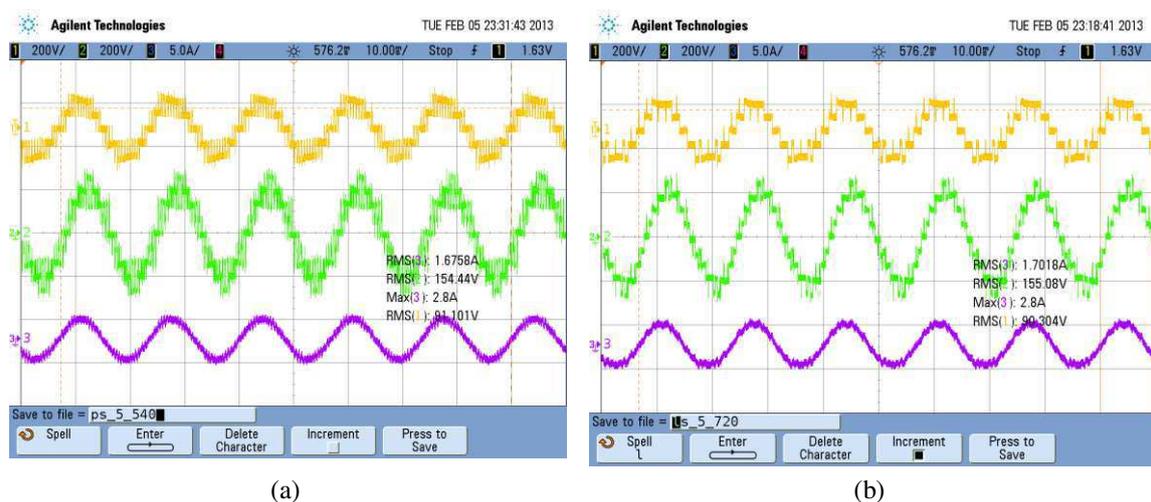


Figura 27: De cima para baixo: Tensão de fase, Tensão de linha e Corrente de linha, obtidos para um conversor em cascata de cinco níveis: (a) modulação por deslocamento de fase das portadoras; (b) modulação por deslocamento de nível das portadoras.

Na Figura 28 estão os resultados obtidos para o conversor configurado para um funcionamento com sete níveis.

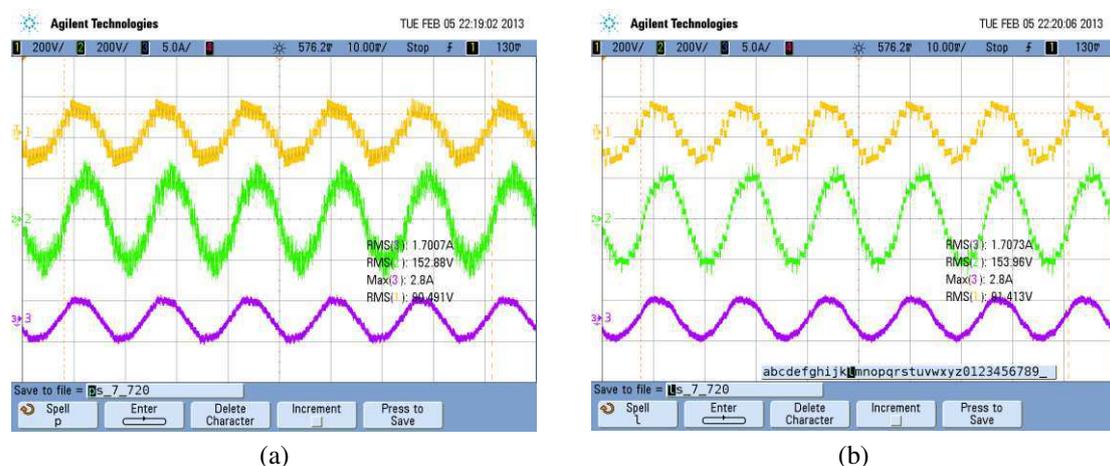


Figura 28: De cima para baixo: Tensão de fase, Tensão de linha e Corrente de linha, obtidos para um conversor em cascata de sete níveis: (a) modulação por deslocamento de fase das portadoras; (b) modulação por deslocamento de nível das portadoras.

Como se utiliza a mesma frequência de chaveamento para os dois tipos de conversores, então é possível comparar os resultados obtidos para as duas estratégias de modulação. No caso da modulação por deslocamento de fase das portadoras, todas as chaves comutam na mesma frequência, ao passo que para a modulação por deslocamento de nível da portadora algumas chaves comutam em frequências distintas. Além disso, as tensões apresentam uma maior taxa de distorção harmônica (THD) para a modulação por deslocamento de fase das portadoras, isso pode ser explicado por esta diferença entre as frequências de comutação das chaves na estratégia de deslocamento em nível.

4 CONCLUSÃO

Durante a realização do estágio supervisionado no LEIAM foi possível a ampliação dos conhecimentos relativos aos conversores multinível no que concerne ao entendimento do seu princípio de funcionamento e montagem experimental.

A partir do funcionamento dos conversores multinível: *Conversor Aninhado*, *Conversor back-to-back tipo NPC de três níveis* e o *Conversor Convencional em Cascata*, foram analisadas as estratégias de modulação para cada topologia específica e em seguida, foram monitorados os procedimentos práticos para obtenção de resultados experimentais nas três estruturas.

Durante o período do estágio, recorreu-se a livros específicos de eletrônica de potência além de artigos científicos relativos às estratégias de modulação e controle aplicadas aos conversores multinível. Deste modo, foi possível consolidar a base teórica aprendida durante a graduação na realização de experimentos e análise dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, “A new neutral-point-clamped pwm inverter,” Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. IA-17, pp. 518 –523, Sept. 1981.
- [2] E. C. dos Santos Jr, J. H. G. Muniz, E. R. C. da Silva and C. B. Jacobina, “Nestled Multilevel Configurations” Industry Applications, IEEE Transactions, pp. 324 –329, 2012.
- [3] YINGCHAO, Z.; ZHENGMING, Z.; TING, L.; YONGCHANG, Z. e LIQIANG, Y. (2008) “A novel control scheme for three-level NPC back-to-back converter”, In: Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE, pp. 1 –5.
- [4] JACOBINA, C.; DE FREITAS, I.; DA SILVA, E.; LIMA, A. e RIBEIRO, R. (2006) “Reduced Switch Count DC-Link AC/AC Five-Leg Converter”, Power Electronics, IEEE Transactions on, 21(5):1301 –1310.
- [5] WU, Bin. *High-Power Converters and AC Drives*.2006 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Chapter 7,pp. 119 – 142.
- [6] DE OLIVEIRA, A.S., J.; DA SILVA, E. e JACOBINA, C. (2004) “A hybrid PWM strategy for multilevel voltage source inverters”, In: Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, vol. 6, pp. 4220 – 4225 Vol.6.

