



PRPG | Pró-Reitoria de Pós-Graduação
PIBIC/CNPq/UFPG-2009

DESENVOLVIMENTO DE CONVERSORES ESTÁTICOS NÃO ISOLADOS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Vágner Fonsêca Nóbrega¹, Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa²

RESUMO

O objetivo deste artigo é avaliar um método de controle para entrega potência em aplicações fotovoltaicas que utilizam inversores multiníveis. O método é baseado em um vetor PWM e permite aos vetores selecionados uma forma de controlar o fluxo de potência. Avaliações preliminares com inversores com neutro grampeado alimentados por fontes de tensão ideais foram realizadas, e os resultados mostram que é possível um controle efetivo.

Palavras-chaves: inversores, PWM vetorial e energia.

DEVELOPMENT OF NOT STATIC CONVERTER FOR ISOLATED FOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstract

The aim of this paper is to evaluate a power delivery control method for photovoltaic applications that use multilevel inverters. The method is based on vector PWM and allows to selected vectors in a way to control the power flow. Preliminary evaluations with neutral clamped inverters fed from ideal voltage sources were performed, and results show that an effective control is possible.

Key-Words: inverters, vector PWM and energy.

INTRODUÇÃO

O projeto “Desenvolvimento de Conversores Estáticos não Isolados para Sistemas Fotovoltaicos” tem por principal característica a utilização de painéis fotovoltaicos juntamente com os inversores a fim de alimentar cargas trifásicas a.

Inicialmente é interessante sabermos como funcionam os inversores de frequência, nome pelo qual são conhecidos no mercado. Este dispositivo funciona convertendo a tensão da rede senoidal alternada em tensão contínua e que, por fim, converte esta última em uma tensão de frequência e amplitude variável.

Existem diferentes maneiras de se analisar os inversores, entre elas esta a análise vetorial do sistema. Segundo PINHEIRO (2005) com ela podemos, reduzir o número de comutações das chaves, reduzir o conteúdo harmônico na tensão de saída e aumentar o índice de modulação em amplitude do inversor.

Na análise vetorial é importante entender que a aplicação dos vetores pode ser feita como melhor se adaptar o sistema, posteriormente aplicaremos painéis fotovoltaicos no lugar dos capacitores do barramento cc.

Os painéis fotovoltaicos têm uma tensão muito baixa, assim para conseguirmos acionar a carga através deles é necessário que utilizemos painéis em série para aumentar a tensão que será entregue a carga, logo como visto nos inversores os capacitores do barramento cc estão em série, por esse motivo utilizamos essa topologia de inversores, para na sequência do estudo apenas substituímos os capacitores pelos painéis. (Período muito longo! Favor utilizar duas ou três orações.)

Neste artigo, apresentaremos as técnicas utilizadas para obter o controle de energia, a fim de que possamos utilizar cada painel em seu máximo ponto de operação.

¹ Aluno de Curso de Engenharia Elétrica, Depto. de Engenharia Elétrica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: vagner.nobrega@dee.ufcg.edu.br

² Engenheira Elétrica, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia Elétrica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: mbrcorrea@dee.ufcg.edu.br

MATERIAL E MÉTODOS

Para estudarmos o funcionamento dos inversores utilizamos simulações no computador, inicialmente simulamos alguns inversores mais simples a fim de melhor compreendermos o funcionamento básico de um inversor, dois inversores em especial foram estudados mais a fundo o inversor trifásico de três níveis (Figura 1) e o de quatro níveis (Figura 2), ambos tem característica parecidas, mas algumas diferenças são interessantes e foi nelas que focamos nossa atenção.

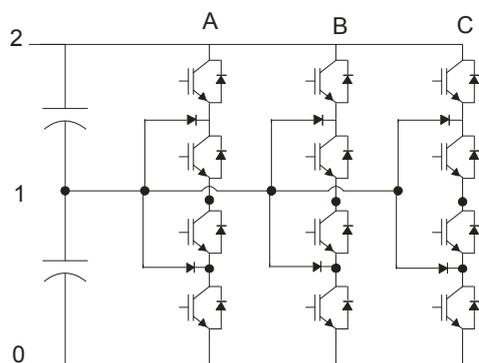


Figura 1. Inversor Trifásico de Três Níveis.

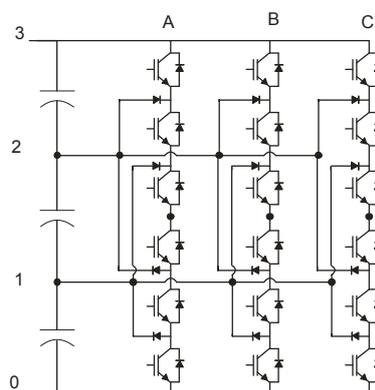


Figura 2. Inversor Trifásico de Quatro Níveis.

PWM Vetorial

Nas simulações utilizamos um método de implementação conhecido como PWM vetorial, este permite termos uma análise geral do inversor, dando um controle maior sobre o mesmo. Segundo PINHEIRO (2005) este método consiste na verificação de todas as possibilidades de combinações das chaves do inversor, logo para o inversor da Figura 1 temos três em cada braço (braços A,B e C) do mesmo, assim temos um total de 27 possibilidades diferentes e no da Figura 2 temos quatro em cada braço o que dá um total de 64.

Para que possamos representar as tensões de fase através de vetores em um espaço bidimensional é necessário realizar uma transformação tal como descrita em (2). Nesta transformação pode-se verificar que a variável "0" será nula, enquanto d e q passam a representar as coordenadas do vetor de tensão.

$$T_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = T_{dq} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde T_{dq} é a matriz de transformação; V_A, V_B e V_C são as tensões referentes a cada braço; V_d componente horizontal do vetor; V_q componente vertical do vetor.

Na Equação 1 temos a matriz de transformação, esta matriz é multiplicada pelas tensões de fase do inversor (Equação 2) onde a informação das três tensões foi resumido em apenas duas, pois desconsideramos V_0 .

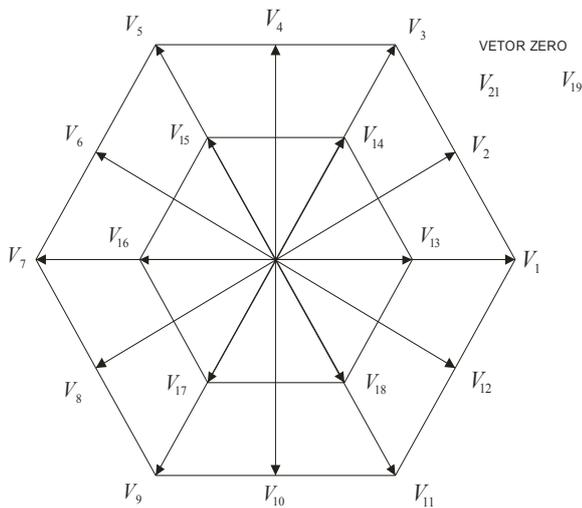


Figura 3. Espaço Vetorial para Inversor de Três Níveis.

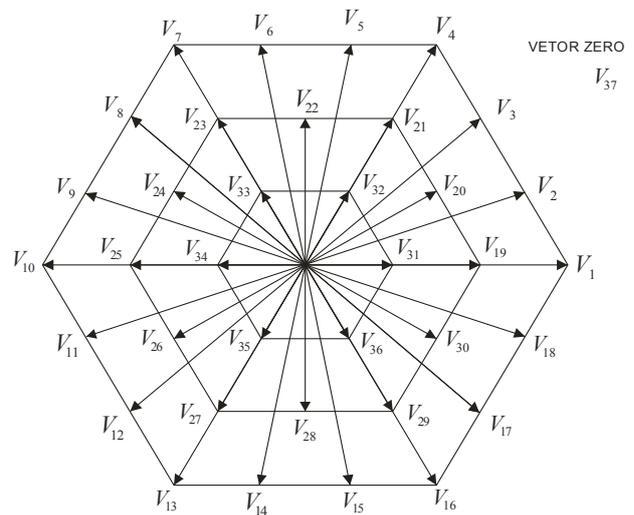


Figura 4. Espaço Vetorial para Inversor de Quatro Níveis.

Uma vez que os inversores só permitem valores discretos para as tensões V_A , V_B e V_C , o resultado esperado é um conjunto de vetores. Nas Figuras 3 e 4 temos os vetores referentes às possibilidades de chaveamento. Analisando o hexágono mais externo de ambos, temos vetores de maior amplitude que ocorrem uma única vez e a medida que esse hexágono diminui, o número de possibilidades aumenta (essas possibilidades fazem referência aos níveis de tensão dos inversores), como CELANOVIC (2000) constatou anteriormente que os vetores de pequena amplitude aparecem em pares para o inversor de três níveis. Por exemplo: o vetor V_{31} da Figura 2 tem três possibilidades. Esta descrição é melhor visualizada nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Possibilidades de chaveamento para Inversor de Três Níveis

Vetor	Possibilidade(s)			Vetor	Possibilidade(s)		
	A	B	C		A	B	C
V_1	2	0	0	V_{11}	2	0	2
V_2	2	1	0	V_{12}	2	0	1
V_3	2	2	0	V_{13}	2	1	1
V_4	1	2	0	V_{14}	1	0	0
V_5	0	2	0	V_{15}	2	2	1
V_6	0	2	1	V_{16}	1	1	0
V_7	0	2	2	V_{17}	1	2	1
V_8	0	1	2	V_{18}	0	1	0
V_9	0	0	2	V_{19}	1	2	2
V_{10}	1	0	2	V_{19}	0	1	1
				V_{19}	2	2	2
				V_{19}	1	1	1
				V_{19}	0	0	0

Tabela 2. Possibilidades de chaveamento para Inversor de Quatro Níveis

Vetor	Possibilidade(s)			Vetor	Possibilidade(s)			Vetor	Possibilidade(s)						
	A	B	C		A	B	C		A	B	C				
V_1	3	0	0	V_{11}	0	2	3	V_{21}	3	3	1	V_{31}	3	1	1
								V_{21}	1	1	0	V_{31}	2	1	1
												V_{31}	1	0	0

V_2	3	1	0	V_{12}	0	1	3	V_{22}	1	3	2	V_{32}	3	3	2	
									1	2	0		2	2	1	
									1	3	1		1	1	0	
V_3	3	2	0	V_{13}	0	0	3	V_{23}	1	3	1	V_{33}	2	3	2	
									0	2	0		1	2	1	
									0	2	0		0	1	0	
V_4	3	3	0	V_{14}	1	0	3	V_{24}	1	3	2	V_{34}	2	3	3	
									0	2	1		1	2	2	
									0	2	1		0	1	1	
V_5	2	3	0	V_{15}	2	0	3	V_{25}	1	3	3	V_{35}	2	2	3	
									0	2	2		1	1	2	
									0	2	2		0	0	1	
V_6	1	3	0	V_{16}	3	0	3	V_{26}	1	2	3	V_{36}	3	2	3	
									0	1	2		2	1	2	
									0	1	2		1	0	1	
V_7	0	3	0	V_{17}	3	0	2	V_{27}	1	1	3	V_{37}	3	3	3	
									0	0	1					
									2	1	3			2	2	2
V_8	0	3	1	V_{18}	3	0	1	V_{28}	1	0	2					
									3	1	3			1	1	1
V_9	0	3	2	V_{19}	3	1	1	V_{29}	2	0	2					
									3	1	3					
									2	0	2					
V_{10}	0	3	3	V_{20}	3	2	1	V_{30}	3	1	2			0	0	0
									1	0	1					

De posse dessas tabelas, podemos então simular o funcionamento do inversor. Para isto utilizaremos uma tensão de referência, uma para cada braço do inversor. Da mesma maneira que fizemos com as tensões de fase, faremos com as de referência em termos de transformação. Assim, com base em uma média ponderada pelo tempo de utilização dos vetores disponíveis, teremos um vetor equivalente ao de referência.

$$\begin{bmatrix} V_{d(ref)} \\ V_{q(ref)} \end{bmatrix} = T_{dq} \begin{bmatrix} V_{ref1} \\ V_{ref2} \\ V_{ref3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

em que V_{ref1} , V_{ref2} e V_{ref3} são as tensões de referência; $V_{d(ref)}$ é a componente horizontal do vetor de referência; $V_{q(ref)}$ é a componente vertical do vetor de referência

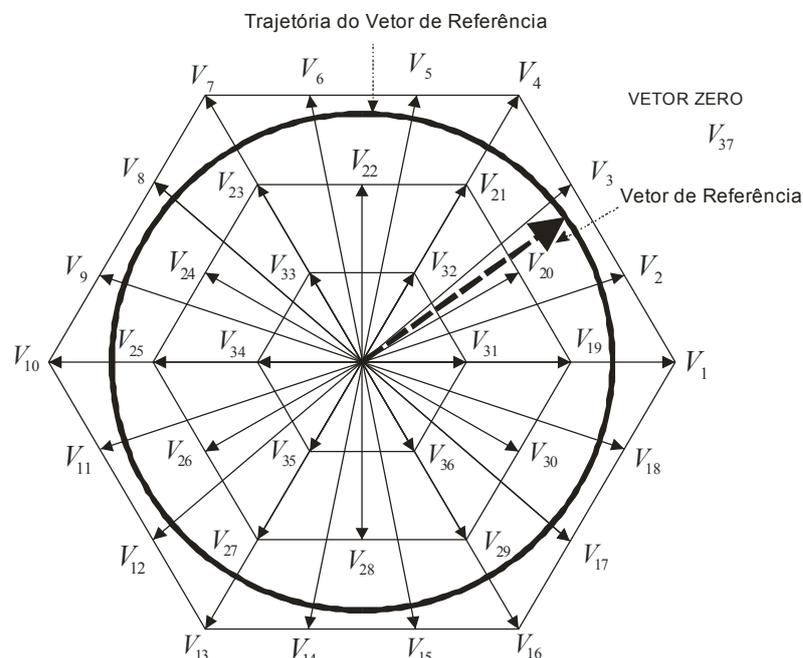


Figura 5. Vetor de Referência e Trajetória do vetor de Referência.

Na Figura 6 vemos que o vetor de referência realiza uma trajetória circular por dentro dos hexágonos e que o módulo do mesmo pode ser ajustado de acordo com o índice de modulação desejado para o inversor, mais tarde falaremos sobre as características de cada índice de modulação.

Segundo CELANOVIC (2000) para calcular o tempo de aplicação de cada vetor faremos uma média ponderada com as componentes V_d e V_q dos vetores utilizados. Para essa média utilizaremos os três vetores mais próximos ao vetor de referência. A soma dos tempos de aplicação de cada vetor deve ser igual ao período de PWM, assim teremos as seguintes relações:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{d(ref)} = \frac{V_{1d}T_1}{T_{PWM}} + \frac{V_{2d}T_2}{T_{PWM}} + \frac{V_{19d}T_3}{T_{PWM}} \\ V_{q(ref)} = \frac{V_{1q}T_1}{T_{PWM}} + \frac{V_{2q}T_2}{T_{PWM}} + \frac{V_{19q}T_3}{T_{PWM}} \\ T_{PWM} = T_1 + T_2 + T_3 \end{array} \right. \quad (4)$$

Onde V_{1d} , V_{2d} , V_{19d} , V_{1q} , V_{2q} e V_{19q} são as componentes horizontal e vertical dos vetores próximos ao vetor de referência, respectivamente; T_1 , T_2 e T_3 são os tempos de aplicação dos vetores V_1 , V_2 e V_{19} , respectivamente; T_{PWM} é o período de PWM.

Estudo da aplicação dos tempos no balanço de energia

Como citamos anteriormente, os vetores de menor amplitude, ou seja, os mais internos, tem mais de uma possibilidade de serem gerados, como visualizamos nas tabelas 1 e 2. De uma outra forma, podemos dizer que podemos definir quais os níveis a serem utilizados para sintetizar o vetor. Assim, na aplicação dos tempos destes podemos utilizar qualquer um dos dois. Essa escolha será muito importante para o nosso estudo, pois desejamos controlar o fluxo de energia no barramento cc.

Para controlar esse fluxo, aplicaremos o tempo de cada vetor de acordo com o desejado. Com este método de implementação é possível controlar o fornecimento da energia, ou seja, podemos escolher qual dos capacitores fornecerá mais energia. Este é o motivo pelo qual utilizamos o PWM vetorial, pois posteriormente substituiremos os capacitores por painéis fotovoltaicos. Neste caso é de grande importância controlar o fornecimento de energia, uma vez que se trata de uma fonte limitada.

Abaixo temos um esquema de como funciona essa aplicação dos tempos dentro de um período de PWM:

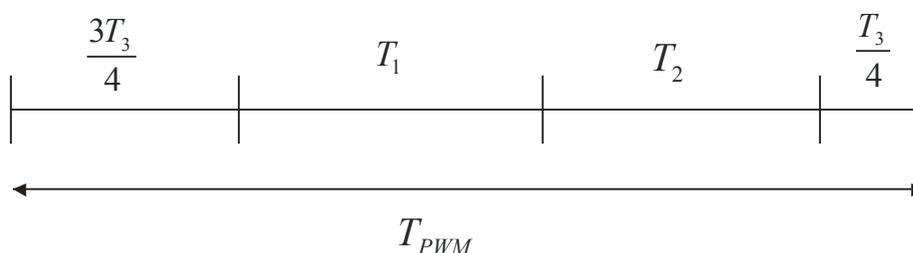


Figura 6. Esquema de aplicação dos tempos em um período de PWM.

Para explicar o esquema da figura 4, vamos utilizar as tensões da equação 4. Vemos que o vetor V_{19} (tempo T_3) tem duas possibilidades, assim podemos ajustar de acordo com o necessário qual dos capacitores fornecera mais energia. Na aplicação destes vetores, segundo PINHEIRO (2005), devemos levar em consideração a menor seqüência de comutação de chaves possível, para melhor desempenho do sistema, de preferência que a cada comutação uma chave apenas seja mudada.

Para calcularmos efetivamente esta energia foi necessário saber as correntes que passavam pelos capacitores, para isso analisamos os circuitos que se formavam à medida que mudávamos as chaves de posição, assim calculamos a potência fornecida por cada uma, por sua vez de posse da potência podemos calcular sua energia a partir da seguinte relação:

$$Energia = \int Pot dt \quad (5)$$

Onde Pot é a potencia entregue a carga.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor compreensão do que será apresentado nós tópicos que seguem quando falarmos em capacitor superior estamos fazendo referência ao capacitor que esta entre os números 2 e 1 da Figura 1 e 3 e 2 no caso da Figura 2, por sua vez capacitor inferior esta entre 1 e 0 na Figura 1 e mesma numeração na Figura 2. Por fim capacitor do meio faz referência ao capacitor que esta entre os números 2 e 1 apenas para a Figura 2.

Cada vetor que venha ser aplicado tem seu tempo especifico obedecendo a (4), logo para vetores que tem mais de uma possibilidade dividiremos este tempo de acordo com o que desejarmos, a seguir temos alguns exemplos que ilustram esta possibilidade de controle.

Inversor Trifásico de Três Níveis

Simulando o funcionamento deste inversor obtivemos o seguinte gráfico para sua tensão chaveada:

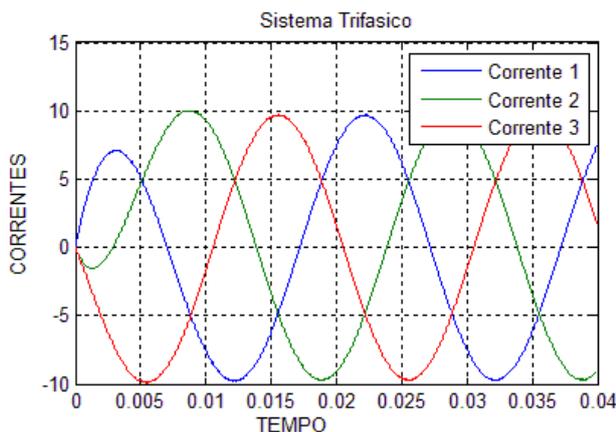


Figura 7. Correntes que circulam pela carga.

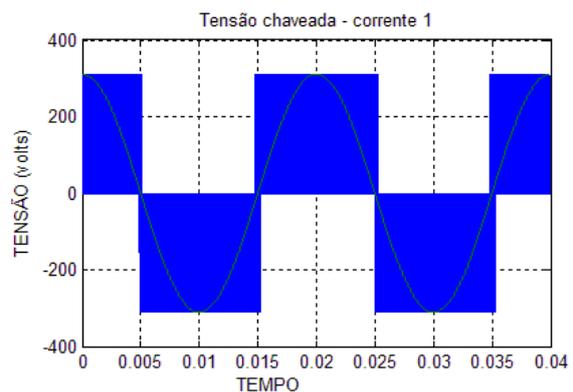


Figura 8. Tensão Chaveada referente à corrente 1.

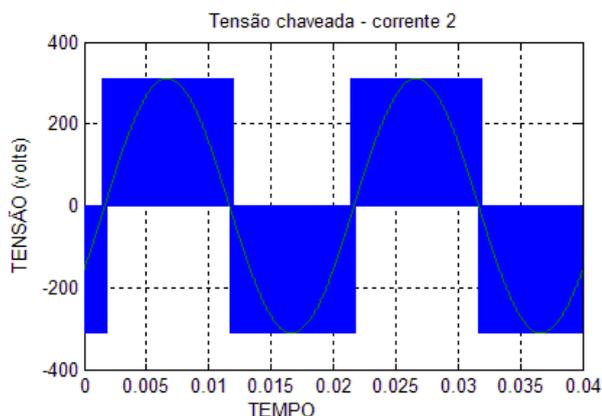


Figura 9. Tensão Chaveada referente à corrente 2.

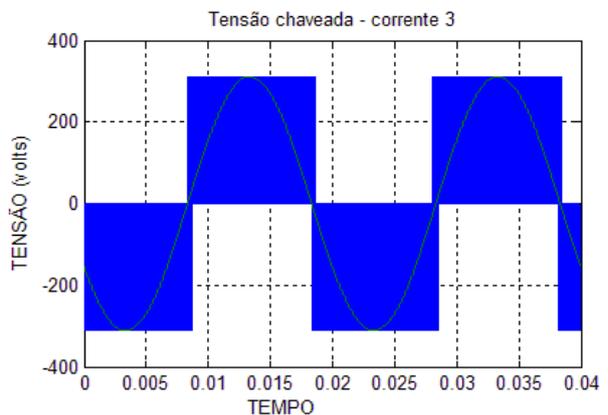


Figura 10. Tensão Chaveada referente à corrente 3.

Analisando estes gráficos, vemos os três níveis de tensão ($V_E, 0, -V_E$), onde V_E é a tensão máxima do barramento cc, utilizados para alimentar a carga trifásica, vemos também o desenho da tensão de referência.

Nos gráficos que seguem temos a análise das energias para este tipo de inversor, avaliaremos alguns casos para mostrar como a entrega da energia pode ser controlada.

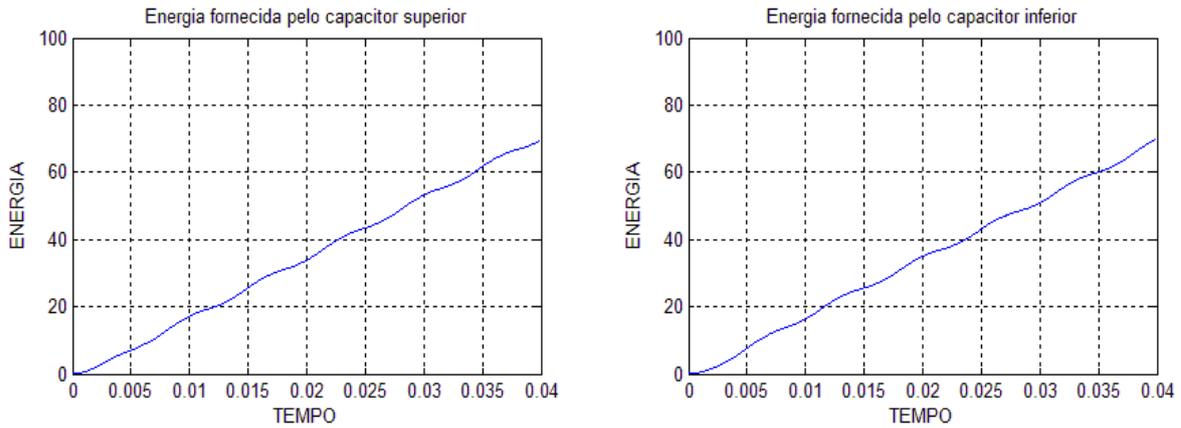


Figura 11. Gráfico da Energia Natural, para $m=1$.

Neste gráfico temos as energias dos dois capacitores quando $m=1$ (onde m é o índice de modulação) e utilizando 50% do tempo cada uma das possibilidades que os vetores de pequena amplitude possuem (ver Tabela 1). Assim, temos que quando procedemos dessa maneira os capacitores fornecem a mesma quantidade de energia $Energia_{(Natural)} = 69,5J$, esta energia será chamada de energia natural do sistema, pois seria a energia fornecida caso não modificássemos o tempo de aplicação dos vetores.

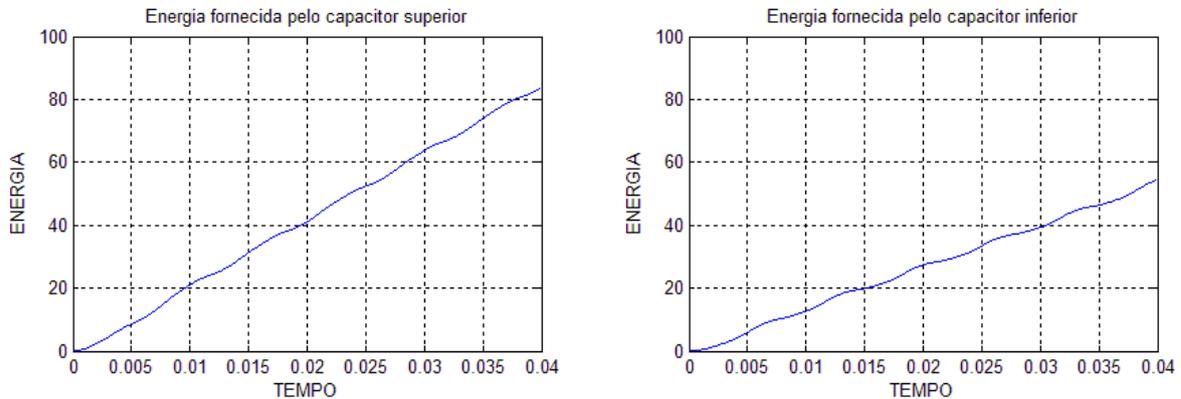


Figura 12. Gráfico da Energia referente ao caso máximo, para $m=1$.

Utilizando apenas os vetores referentes ao capacitor superior, teremos o caso de fornecimento máximo de energia para o capacitor citado, que corresponde a $Energia_{(Máximo)} = 83,7J$, temos então o máximo de energia que podemos fornecer ao sistema para este índice de modulação. Esta energia corresponde a um acréscimo de 20% na energia natural do sistema, esta análise é igual para o capacitor inferior.

Analisamos a energia no sistema com índices de modulação menores. A seguir, temos alguns gráficos para diferentes índices de modulação.

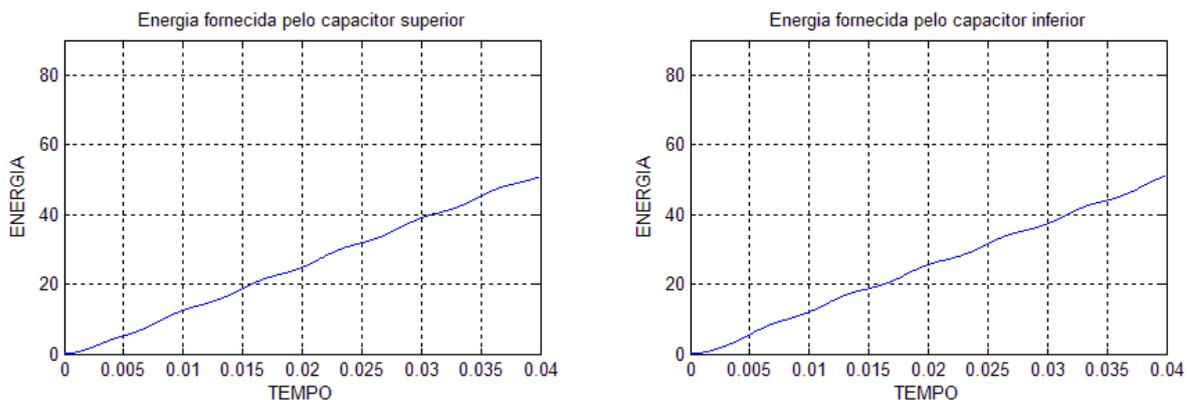


Figura 13. Gráfico da Energia Natural, para $m=0,9$.

Para o $m=0,9$, temos que a $Energia_{(Natural)} = 50,62J$.

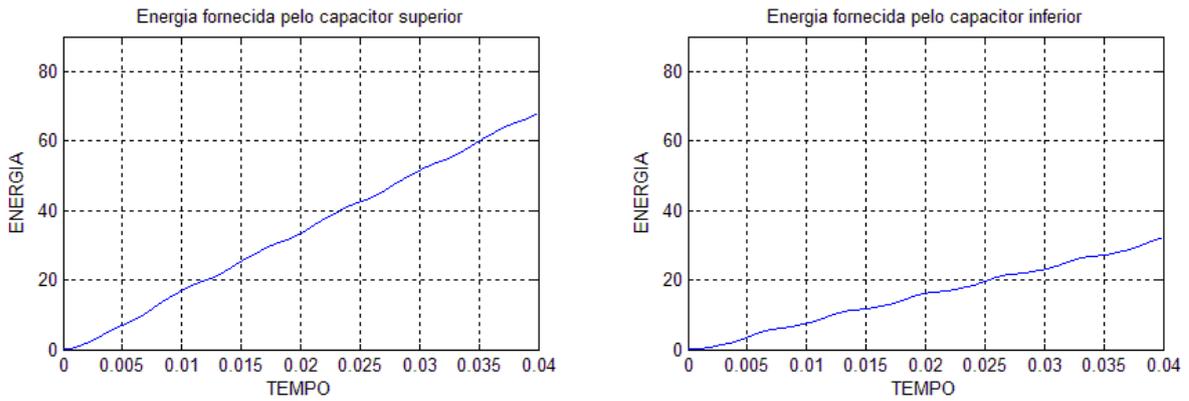


Figura 14. Gráfico da Energia referente ao caso máximo, para $m=0,9$.

Fazendo procedimento semelhante ao realizado para $m=1$, teremos então um acréscimo de aproximadamente 36%.

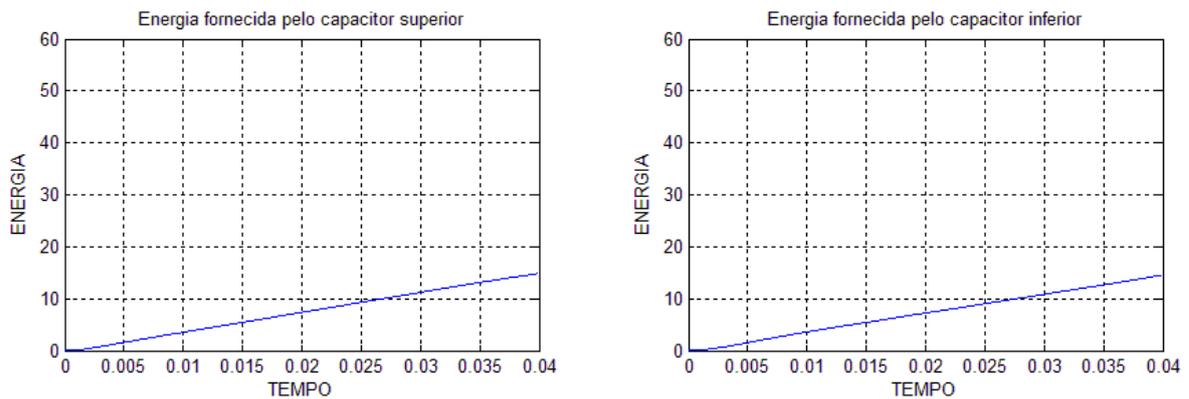


Figura 15. Gráfico da Energia Natural, para $m=0,6$

Para o $m=0,6$, temos que a $Energia_{(Natural)} = 14,84J$.

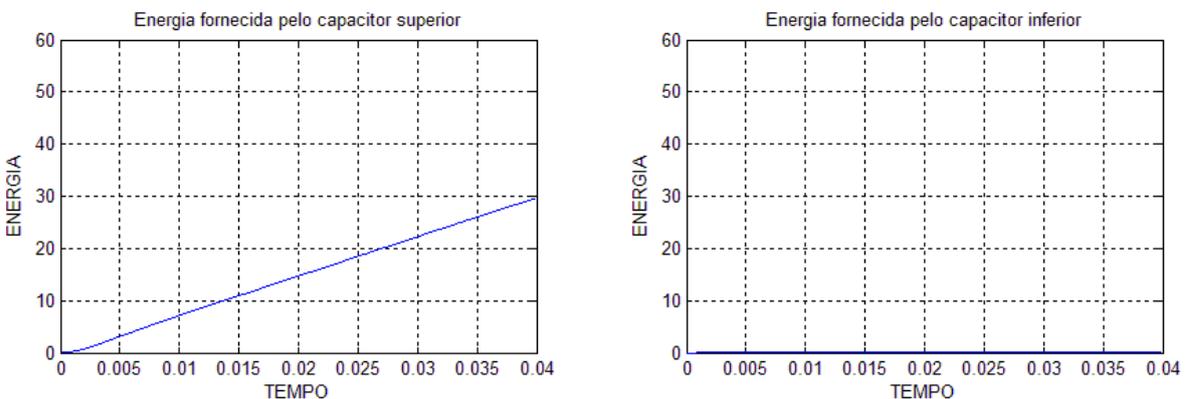


Figura 16. Gráfico da Energia referente ao caso máximo, para $m=0,6$.

Para este índice vemos que conseguimos um acréscimo de aproximadamente 100% de energia, ou seja para este índice temos o controle total da energia no sistema.

Inversor Trifásico de Quatro Níveis

Após a simulação deste inversor, tivemos as seguintes repostas para as tensões chaveadas referentes a cada braço e para as correntes que circulam pela carga.

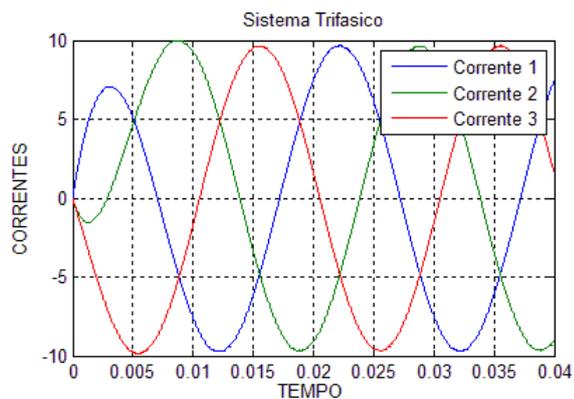


Figura 17. Correntes que circulam pela carga.

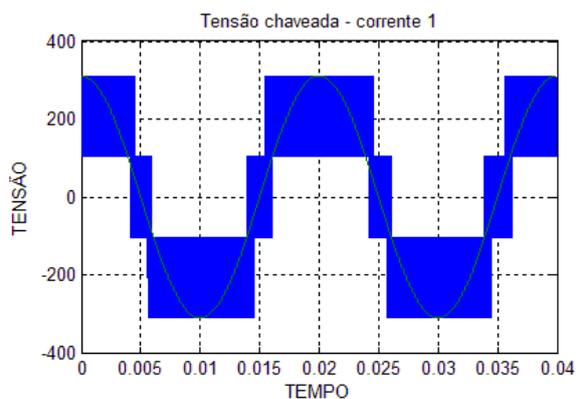


Figura 18. Tensão Chaveada referente à Corrente 1.

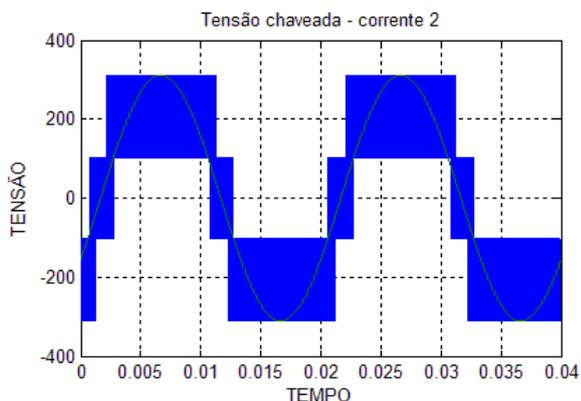


Figura 19. Tensão Chaveada referente à Corrente 2.

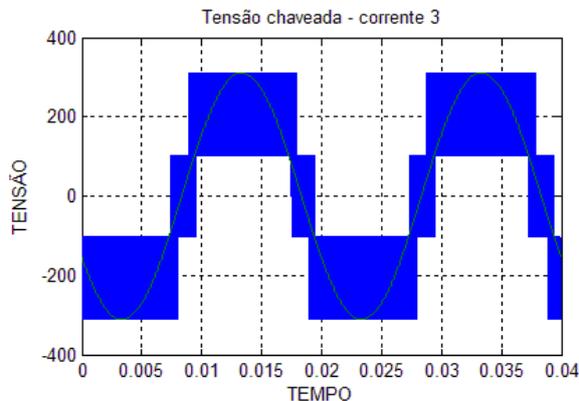


Figura 20. Tensão Chaveada referente à Corrente 3.

Vemos então os quatro níveis do inversor ($V_E, \frac{V_E}{3}, -\frac{V_E}{3}, -V_E$), através de suas tensões chaveadas e o sistema trifásico de correntes como desejado para a carga.

Faremos agora análise semelhante à realizada para o inversor de três níveis, onde apresentamos os gráficos de energia para diferentes índices de modulação.

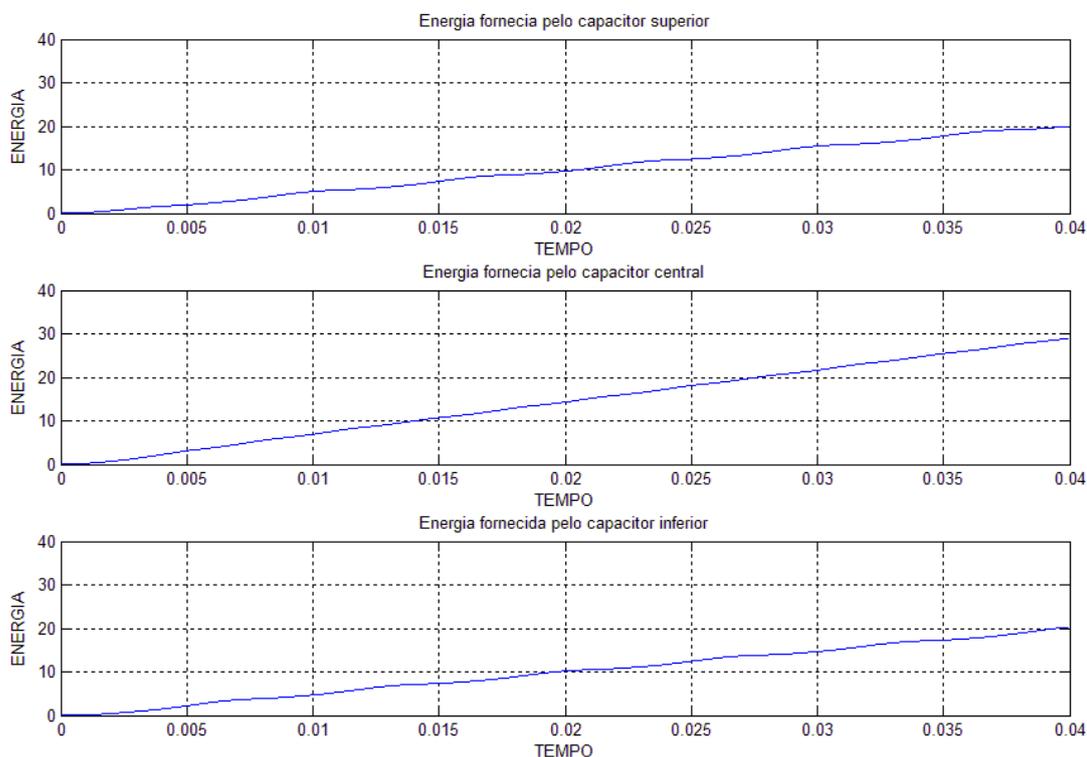


Figura 21. Gráfico da Energia Natural, para $m=1$.

Os gráficos da Figura 21 são referentes ao estado natural do sistema para $m=1$, ou seja os tempos de cada possibilidade são iguais. Neste índice de modulação não temos a possibilidade de controlar a energia do capacitor central, pois analisando a tabela 2 vemos que a possibilidade referente a este índice permite utilizar ou os capacitores central e superior, ou central e inferior, o que implica que o capacitor central sempre será utilizado. Assim consideraremos a energia natural do sistema dada pelo capacitor superior (ou inferior), $Energia_{(Natural)} = 20J$.

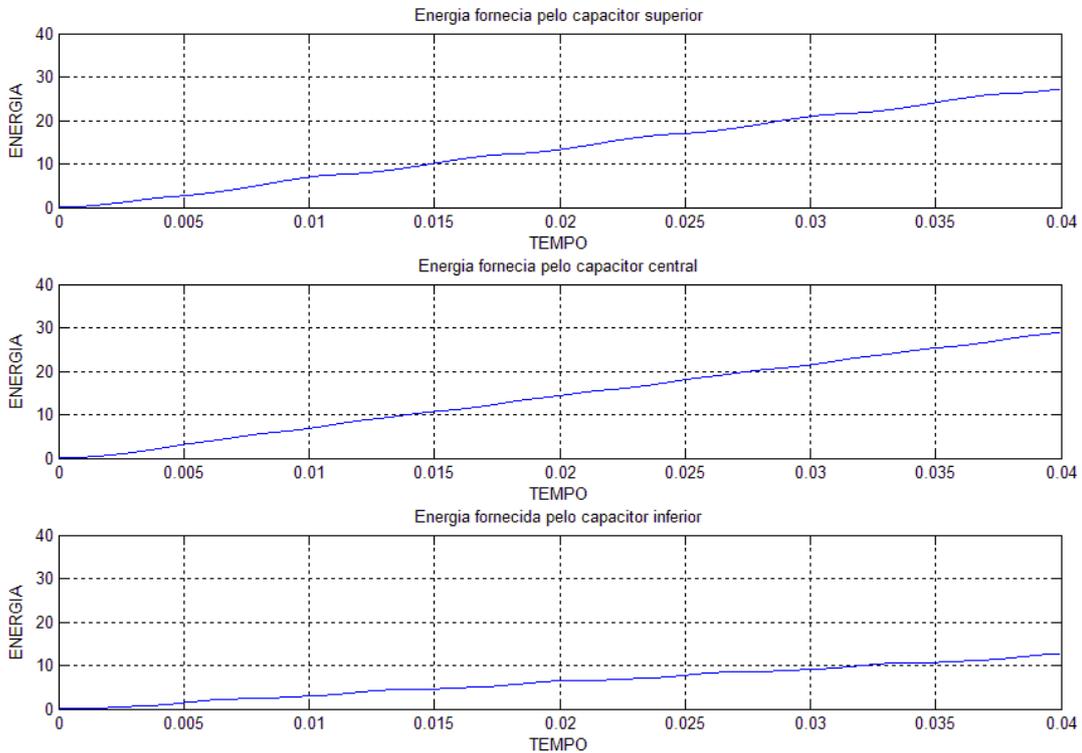


Figura 22. Gráfico da Energia referente ao caso máximo, para $m=1$.

Na Figura 22 o vetor referente ao capacitor superior foi utilizado 100% do tempo. Assim poderemos ter então um acréscimo de no máximo 36%, este cálculo foi realizado levando em consideração que a energia do capacitor central não varia e isto é comprovado pelas Figuras 21 e 22.

Para índices menores teremos algumas diferenças, como veremos no gráfico da Figura 24:

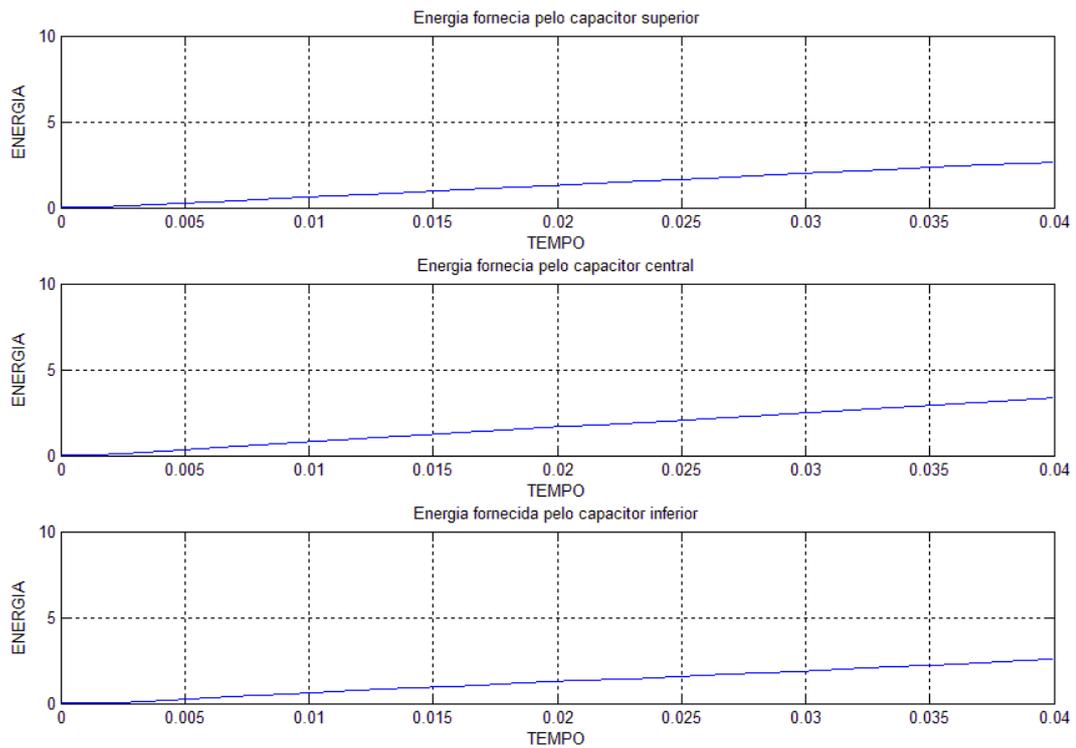


Figura 23. Gráficos da Energia Natural, para $m=0,5$.

Para $m=0,5$, teremos vetores com duas e três possibilidades, para obtermos a resposta natural do sistema utilizamos 50% do tempo os vetores de duas possibilidades e 33,33% do tempo os vetores de três possibilidades, assim vemos no gráfico da Figura 23.

Neste caso, diferente do anterior,, podemos controlar também a energia do capacitor central nas Figuras 24 e 25, temos o capacitor central com energia máxima e o superior, respectivamente.

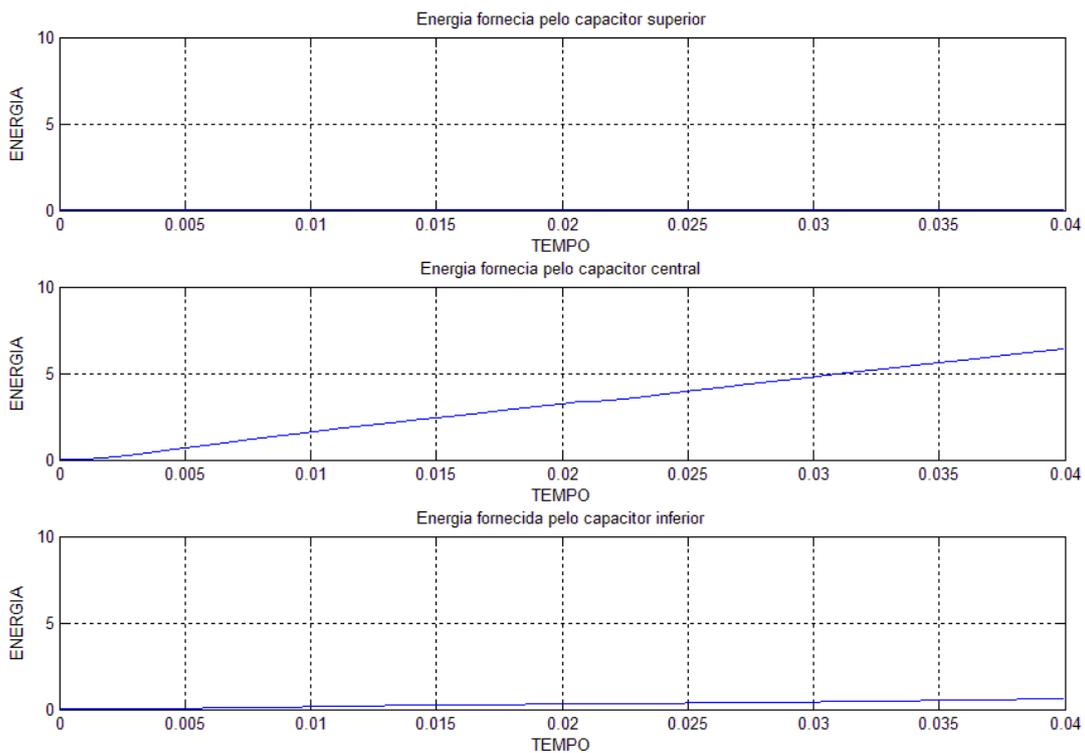


Figura 24. Gráficos da Energia referente ao caso máximo do capacitor central, para $m=0,5$.

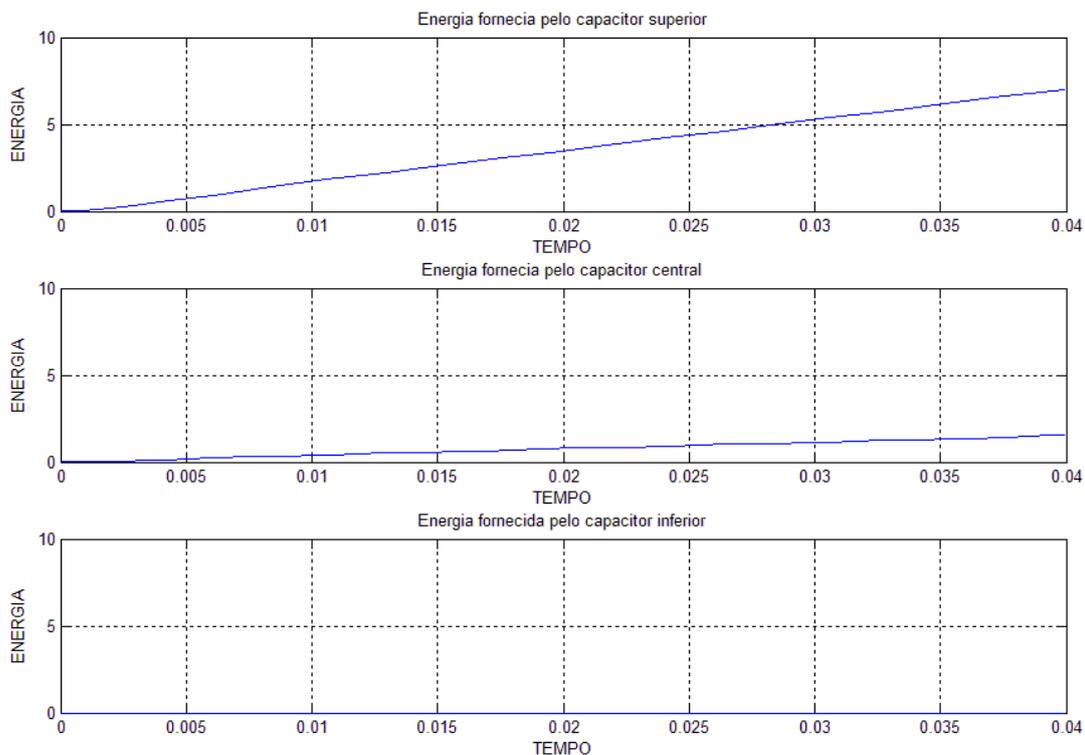


Figura 25. Gráficos da Energia referente ao caso máximo do capacitor superior, para $m=0,5$.

Em geral à medida que diminuimos o índice de modulação podemos ter mais autonomia sobre cada capacitor separadamente.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos com as simulações dos inversores e da análise do fluxo de energia concluímos que é possível definir o fornecimento de energia para os diferentes níveis, através do método PWM vetorial. Essa possibilidade de controle aumenta à medida que diminuimos o índice de modulação, pois utilizaremos vetores com maior autonomia, ou seja, dependem apenas de um dos capacitores. Todavia com índice de modulação menor será entregue menos energia a carga, podemos aumentar o índice de modulação e conseguiremos maior energia, porem menos controle sobre o fornecimento da mesma.

Por fim posteriormente os capacitores serão substituídos por painéis fotovoltaicos, assim, sabendo que os painéis têm pontos de operações diferentes dependendo da insolação recebida por eles, poderemos, através deste método, escolher em qual deles se deseja trabalhar.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PINHEIRO, H. et al. “**Modulação space vector para inversores alimentados em tensão: uma abordagem unificada**” Revista Controle & Automação/Vol.16 no.1/Jan.,Fev. e Março 2005.

CELANOVIC, Nikola; BOROYEVICH, Dushan. “**A Comprehensive Study Neutral-Point Voltage Balancing Problem in Three-Level Neutral-Point-Clamped Voltage Source PWM Inverters**” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, no 2, pp. 242-245, march 2000

PWM, **Space Vector**; Disponível em: <http://www.ece.osu.edu/ems/PowerConverter/SpaceVectorPWM1.pdf>
 Acesso em: 20 fev. 2009.

