

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Controlo de Armazenamento de
Energia em Barramento CC**

Rui Pedro Moreira Marcelino

RELATÓRIO FINAL DE PREPARAÇÃO DA DISSERTAÇÃO (PDI)

Orientador:

Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho

13 De Fevereiro de 2013

Índice

Índice de Figuras	4
Índice de Tabelas.....	5
Abreviaturas.....	6
Capítulo 1	7
1. Introdução.....	7
2. Objetivos	7
3. Planeamento	7
Capítulo 2	8
1. Introdução.....	8
2. Baterias.....	8
2.1 Tensão da célula.....	8
2.2 Capacidade de carga	9
2.3 Energia Armazenada	9
2.4 Densidade de Energia.....	9
2.5 Densidade de Energia Volumétrica	10
2.6 Potência Específica.....	10
3. Tipos de Baterias	11
3.1 Níquel Cádmio (NICD).....	11
3.2 Níquel Hidreto Metálico (NI-MH).....	12
3.3 Chumbo Ácido (Pb).....	13
3.4 Iões de Lítio (LI-ON).....	14
3.5 Iões de Lítio Polímero (Li-Pos).....	15
3.6 Iões de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO4)	16
3.7 Tabela comparativa das diferentes baterias	16
3.8 Modelização das baterias.....	17
4. Ultra-Condensadores (UC)	20
4.1 Modelização dos UC.....	21
5. Conversores de potência.....	22
5.1 Método Linear	22
5.2 Método Conversor comutado.....	22
5.3 Topologias dos conversores	23
6. Controlo (DSP).....	28
Referências.....	29

Índice de Figuras

Figura 1 – Modelo de bateria	17
Figura 2 – Tensão da célula e SOC.....	18
Figura 3 – Modelo de ultra-condensador.....	21
Figura 4 – Topologia do conversor buck	23
Figura 5 – Conversor buck ligado	23
Figura 6 – Conversor buck desligado.....	24
Figura 7 – Topologia do conversor boost.....	24
Figura 8 – Conversor boost ligado.....	25
Figura 9 – Conversor boost desligado	25
Figura 10 – Topologia do conversor buck-boost.....	26
Figura 11 – Conversor buck-boost ligado.....	26
Figura 12 – Conversor buck-boost desligado	27

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Planeamento	7
Tabela 2 – Comparação de tipo de baterias.....	16

Abreviaturas

CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
SOC	Estado de carga
UC	Ultra-condensadores
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>

Capítulo 1

1. Introdução

No seguinte documento apresentado será demonstrado o trabalho desenvolvido até ao momento no contexto da dissertação denominada “Controlo de Armazenamento de Energia em Barramento CC”. O documento relata o estado da arte relativa ao tema e está inserido na unidade curricular “Preparação para a Dissertação” do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Este estado da arte irá essencialmente fazer uma referência às tecnologias e topologias até ao momento para projetar e implementar um barramento CC controlado.

2. Objetivos

Tendo em conta já existir alguns progressos no desenvolvimento de um barramento CC pretende-se que com esta dissertação se obtenha um modelo implementado e completamente funcional. Tendo em vista um projeto inovador será importante a implementação de ultra-condensadores de forma a permitir uma resposta dinâmica do sistema visto este projeto vir futuramente a ser implementado num veículo elétrico.

3. Planeamento

Para esta dissertação é importante ter um planeamento que neste momento será provisório uma vez que futuramente será feito um planeamento mais completo e preciso que deverá ser cumprido com rigor. Contudo teremos em vista as grandes etapas desta dissertação foi elaborado um pequeno planeamento:

Etapa	Objetivo	Tempo de execução
I	Modelização de baterias e ultra-condensadores	4 Semanas
II	Simulação computacional do sistema	4 Semanas
III	Desenvolvimento do controlador	6 Semanas
IV	Ensaio Experimental	3 Semanas
V	Escrita da dissertação	3 Semanas

Tabela 1 - Planeamento

Capítulo 2

1. Introdução

Neste capítulo aborda-se, de uma forma geral, as baterias que poderão ser usadas o barramento CC tal como o sistema de armazenamento de energia. Inicialmente verifica-se alguns aspetos e características que nos poderão ajudar a escolha das baterias. De seguida ilustra-se os principais tipos de baterias tal como as suas vantagens e desvantagens. Posteriormente mostra-se, de uma forma sucinta, uma tabela comparativa dos tipos de bateria. Como temos a necessidade da utilização destes componentes numa simulação será necessário fazer uma modelização das baterias e validar o seu estado de carga (SOC). É também feita uma referência aos Ultra-condensadores e os seus modelos. Sendo este sistema baseado num conversor ou conjunto de conversores é feito um levantamento dos principais conversores que poderão ser usados no barramento analisando os seus prós e contras. Por fim é feito uma análise ao tipo de controlador que será necessário para o controlo e monitorização do barramento.

2. Baterias

As baterias são um componente essencial para um sistema de armazenamento de energia. Podemos considerar este sistema como um conjunto de duas ou mais células eletroquímicas (elétrodo positivo e elétrodo negativo em contacto através de um eletrólito) que permite obter energia elétrica a partir de energia química.

As características elétricas de uma bateria definem o seu comportamento no circuito elétrico e as características físicas têm um impacto importante no seu tamanho, peso, ciclo de vida e performance.

2.1 Tensão da célula

A tensão potencial da bateria varia com o tempo quer devido ao uso quer devido à descarga espontânea (a concentração das espécies electro ativas altera-se).

A tensão nominal de uma pilha indica a tensão aproximada da célula quando esta produz corrente elétrica.

As células podem ser ligadas em série de modo a produzir a tensão global pretendida para determinado efeito. A Tensão da célula é dada pela diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo. Se necessário as células também poderão ser ligadas em paralelo de forma a poder somar as correntes máximas debitadas pelas mesmas.

2.2 Capacidade de carga

É a capacidade deste elemento de fornecer uma corrente com uma determinada intensidade e durante um determinado tempo, medido em hora.

Exemplo: Capacidade de uma bateria = 10Ah – significa que a bateria pode fornecer 1 A durante 10h ou 2 A durante 5h ...

A capacidade nominal é definida pelo fabricante para condições de descarga específicas (intensidade da corrente, temperatura).

2.3 Energia Armazenada

O objetivo de uma bateria é armazenar energia.

A energia armazenada na bateria depende da sua tensão e da carga armazenada.

$$\text{Energia (Wh)} = \text{Tensão (V)} \times \text{Carga (Ah)}$$

A tensão e a capacidade de carga da bateria variam consideravelmente dependendo do modo como a bateria é usada (temperatura e velocidade de descarga).

Quer a voltagem quer a capacidade de carga diminuam se a corrente elétrica aumentar e a bateria gastar-se-á rapidamente.

2.4 Densidade de Energia

A densidade de energia gravimétrica é a quantidade de energia elétrica armazenada por kg de massa.

Uma vez conhecida a energia necessária, esta pode ser dividida pela energia específica para determinar a massa (aproximada) de bateria que é necessário a da bateria (unidade – Wh/kg).

$$\text{Massa bateria (Kg)} = \frac{\text{Energia (Wh)}}{\text{Energia específica (Wh/Kg)}}$$

2.5 Densidade de Energia Volumétrica

A densidade de energia volumétrica é a quantidade de energia elétrica armazenada por metro cúbico de volume da bateria.

$$\text{Volume (m}^3\text{)} = \frac{\text{Energia (Wh)}}{\text{Densidade de Energia (Wh/m}^3\text{)}}$$

2.6 Potência Específica

É a quantidade de potência por Kg de bateria. Embora a bateria tenha uma potência máxima, não é aconselhável que funcione perto deste ponto durante mais do que alguns segundos, uma vez que isso implicaria uma curta duração da bateria e uma operação ineficiente.

Observações:

Algumas baterias têm uma energia específica muito boa, mas têm uma potência específica baixa. Significa que estas baterias armazenam uma grande quantidade de energia, mas apenas a conseguem libertar lentamente.

Uma elevada densidade de potência resulta normalmente numa baixa densidade de energia para qualquer tipo de bateria.

Se a energia for retirada da bateria rapidamente (densidade de potência elevada) a energia disponível será reduzida.

3. Tipos de Baterias

3.1 Níquel Cádmio (NICD)

A bateria de níquel cádmio (também conhecida pelo seu acrônimo NiCd) foi o segundo tipo de pilha ou bateria recarregável a ser desenvolvida.

O polo positivo e o polo negativo encontram-se no mesmo recipiente, com o polo positivo (ou cátodo) coberto de Hidróxido de níquel, e o polo negativo (ou ânodo) coberto de material sensível ao cádmio. Estes são isolados por um separador.

Os polos estão imersos em uma substância eletrolítica, que conduz íons, geralmente uma solução de Hidróxido de potássio (KOH).

As pilhas NiCd são geralmente mais baratas. Contudo, têm menor tempo de vida útil, além de menor capacidade de carga, e podem sofrer de um problema chamado "efeito memória". Quando isso ocorre, a pilha deixa de ser carregada totalmente devido à sua composição química dar sinal de que a carga está completa. O efeito memória acontece quando resíduos de carga na pilha induzem a formação de pequenos blocos de cádmio.

A melhor maneira de evitar o problema é não fazer recargas quando a bateria está parcialmente descarregada. Espera-se que a bateria descarregue totalmente.

As pilhas NiCd estão cada vez mais em desuso, pois para além do efeito memória, de terem menor capacidade e menor tempo de vida útil, esse tipo de bateria é muito poluente, já que o cádmio é um elemento químico altamente tóxico e prejudicial ao meio ambiente.

As principais aplicações são telefones sem fio, *walkie-talkies*, equipamentos médicos, câmaras de vídeo profissionais e ferramentas elétricas.

Vantagens

- Custo reduzido
- Leve

Desvantagens:

- Poluente (cádmio)
- Tempo de vida útil reduzido
- Efeito de Memória
- Menor Capacidade

3.2 Níquel Hidreto Metálico (NI-MH)

A bateria de níquel-hidreto metálico (Ni-MH), apresenta características operacionais similares às da bateria de níquel cádmio, sendo a principal diferença o uso de hidrogénio absorvido numa liga, na forma de hidreto metálico, como material ativo no eletrodo negativo, ao invés de cádmio utilizado nas baterias de níquel cádmio. O sucesso das baterias NiMH tem sido dirigido por sua alta densidade de energia e pelo uso de metais não tóxicos.

As modernas baterias de NiMH oferecem até 100% a mais de densidade de energia em comparação com as baterias de NiCd. Tanto as baterias NiCd como as baterias NiMH têm uma alta taxa de auto-descarga.

A bateria de NiCd perde aproximadamente 10% de sua capacidade dentro das primeiras 24 horas, após o que a auto-descarga é de 10% ao mês. A auto-descarga das baterias de NiMH é 1,5 a 2 vezes a auto-descarga das baterias NiCd

As baterias de NiMH têm substituído as baterias de NiCd nos mercados de comunicações sem fio e computação móvel.

Em muitas partes do mundo o consumidor é encorajado a usar baterias NiMH ao invés de baterias NiCd. Isto deve-se a preocupações ambientais com o descartar das baterias em fim de vida útil.

Inicialmente mais caras que as baterias NiCd, atualmente as baterias NiMH têm preço bem próximo ao das baterias NiCd.

Devido aos problemas ambientais, o consumo e a produção de baterias NiCd têm diminuído, o que provavelmente fará o seu preço crescer.

Vantagens:

- 50 a 100% maior capacidade que as baterias NiCd
- Menor efeito memória
- Não tóxica e não causa danos para o meio ambiente

Desvantagens:

- Repetidos ciclos de carga e descarga profunda reduzem a vida útil da bateria. O desempenho degrada-se após 200 a 300 ciclos
- Descargas parciais no lugar de descargas profundas são preferidas pelas baterias NiMH
- Corrente limitada de descarga. Melhores resultados são conseguidos com correntes de descarga da 0,2 C a 0,5 C (20 a 50 % da corrente nominal).
- Alta taxa de auto-descarga. As baterias de NiMH se auto-descarregam em torno de 50 % mais rápido que as baterias NiCd
- São mais caras que as baterias NiCd. As baterias NiMH projetadas para alta corrente são ainda mais caras

3.3 Chumbo Ácido (Pb)

A bateria chumbo-ácida foi inventada pelo francês *Gaston Planté* em 1860 e é uma associação de pilhas ligadas em série, e a tensão elétrica de cada pilha é de aproximadamente dois volts.

A bateria de chumbo-ácido é constituída por dois elétrodos, um de chumbo esponjoso, e outro de dióxido de chumbo em pó, ambos mergulhados numa solução de ácido sulfúrico com densidade aproximada de 1,28g/mL dentro de uma malha de liga chumbo-antimónio, esta liga é mais resistente à corrosão que o chumbo puro.

Para recarregar a bateria fornece-se corrente contínua no elétrodo de dióxido de chumbo para o de chumbo no que resulta na inversão das reações, neste processo o ácido sulfúrico é regenerado, por isso a percentagem de ácido sulfúrico indica o grau de carga ou descarga da bateria.

É a bateria mais económica quando o problema do peso pode ser desprezado.

É bastante usada em equipamentos hospitalares, cadeira de rodas elétricas, luz de emergência.

Vantagens:

- Custo baixo
- Tecnologia madura, confiável e bem-compreendida
- Auto-descarga baixa. A auto-descarga está entre as mais baixas em sistemas de baterias recarregáveis
- Exigências de manutenção baixas. Sem memória, nenhum eletrólito para encher
- Capaz de taxas elevadas de descarga.

Desvantagens:

- Não pode ser armazenada em uma condição descarregada. A tensão da célula não pode cair abaixo de 2,10 Volts
- Densidade baixa da energia
- Permite somente um número limitado de ciclos cheios de descarga bem adequado para aplicações de espera que requerem somente descargas profundas ocasionais
- Meio hostil. O eletrólito e o conteúdo da carga podem causar danos ambientais.

3.4 Iões de Lítio (LI-ON)

É a tecnologia mais recente e em desenvolvimento/crescimento.

A bateria Li-íon é usada quando se deseja alta densidade de energia e peso leve.

São mais caras e precisam ser utilizadas dentro de padrões rígidos de segurança. São frágeis e requerem um circuito de proteção para manter uma operação segura.

Embutido dentro de cada conjunto, o circuito de proteção limita a tensão de pico de cada célula durante a carga e previne que a tensão da célula caia muito durante a descarga.

Além disso, a máxima corrente de carga e descarga tem de ser limitada e a temperatura da célula tem que ser monitorizada para prevenir temperaturas extremas.

O envelhecimento é uma preocupação com a maioria das baterias.

Alguma deterioração da capacidade é perceptível após 1 ano, se a bateria estiver em uso ou não.

Após de 2 ou 3 anos, a bateria frequentemente falha.

Deve-se mencionar que os outros tipos de baterias também têm efeitos degradação do desempenho relacionados com a idade.

Armazenar a bateria num lugar fresco retarda o processo de envelhecimento da bateria de Lítio-íon (e outras). Fornecedores recomendam armazenar a 15°C (59°F).

Além disso, a bateria só deve ser carregada quando armazenada e esse carregamento deve ser parcial.

Vantagens:

- Densidade da energia elevada. Potencial para capacidades ainda maiores
- Auto-descarga relativamente baixa. A auto-descarga é menor do que a metade da NiCd e NiMH
- Manutenção Baixa. Nenhuma descarga periódica é necessária; sem memória

Desvantagens:

- Requer circuito de proteção - o circuito de proteção limita a tensão e a corrente. A bateria é segura se não sobrecarregada ou sobreaquecida (risco de explosão ou incêndio).
- Sujeito ao envelhecimento, mesmo se não estiver em uso - armazenar a bateria num lugar fresco e a 40 por cento de estado de carga reduz o efeito do envelhecimento
- Moderada corrente de descarga

- Caro de se fabricar - aproximadamente 40 por cento maior no custo do que a de NiCd. Melhores técnicas de fabricação e recolocação de metais raros com alternativas de custo mais baixo, provavelmente reduzirão o preço
- As baterias do Li-íon têm uma alta densidade de energia. Não fazer curto-circuito, não sobrecarregar, não esmagar, não bater, não mutilar, não aplicar polaridade reversa, não expor a altas temperaturas e não desmontar

3.5 Iões de Lítio Polímero (Li-Pos)

É uma versão mais barata da Lítio-Íon.

A química é similar à de Lítio-Íon em termos de densidade de energia. Pode ser fabricada com uma geometria muito fina e permite uma embalagem simplificada.

O Lítio é o mais leve de todos os metais usados em baterias, tem o maior potencial eletroquímico e fornece a maior densidade de energia por peso.

O projeto de polímero seco oferece simplificações no que diz respeito à fabricação, segurança e geometria de perfil fino.

São baterias recarregáveis que usam ânodos de metal de lítio (elétrodos negativos) são capazes de fornecer tanto alta tensão quanto excelente capacidade, resultando numa extraordinária densidade de energia alta.

No entanto, as baterias de Lítio Polímero só podem ser carregadas em carregadores específicos para Lítio Polímero, por causa de suas características especiais que diferem completamente das demais baterias. Existe a possibilidade delas pegarem fogo se não forem carregadas corretamente

Vantagens:

- Perfil muito baixo e leves- baterias que se assemelham a um perfil de cartão de crédito são práticas
- Maior Potência Específica (Relação Potência/Peso)
- Baixa auto-descarga e elevada potência específica
- Segurança ligeiramente melhorada – um pouco mais resistente à sobrecarga. Menor possibilidade de esvaziar o eletrólito

Desvantagens:

- Densidade de energia mais baixa e contagem de ciclo diminuída comparada à bateria de Lítio-Íon. Existe um potencial para melhorias.
- Continua a não suportar sobre carregamentos e descarregamentos excessivos, mantendo-se o risco de explosão ou de incêndio

3.6 Iões de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄)

A tecnologia mais recente de bateria. Reúne as vantagens das baterias de NiCd de segurança e durabilidade com a elevada capacidade e baixo peso das baterias iões lítio e iões lítio polímero.

Têm uma densidade de energia ligeiramente inferior às baterias Li-On, Li-Pos, mas são bastante mais resistentes/tolerantes a condições de sobrecarga, ou subcarga.

Numa situação onde a Li-Po poderia explodir, a célula LiFePO₄ resistiria e, no pior dos casos, libertaria um gás não nocivo.

As células LiFePO₄ apresentam vantagens não só pela segurança, mas também por terem uma maior durabilidade.

Vantagens:

- Segurança e Fiabilidade
- Muito baixa auto-descarga
- Maior tolerância a sobre carregamentos e descarregamentos excessivos
- Maior ciclo de vida

Desvantagens:

- Gama limitada de baterias deste tipo (características)

3.7 Tabela comparativa das diferentes baterias

	Energia específica (Wh/kg)	Densidade de Energia volumétrica (Wh/l)	Potência Específica (W/kg)	Ciclo de Vida (nº ciclos)	Eficiência (%)	Tempo de Carregamento (h)
NiCd	40-60	50-150	150	2000	70-90	1
Ni-Mh	60-120	140-300	250-1000	1000	66	2-4
Pb	30-40	60-75	180	500-800	70-92	8-16
Li-On	90-160	250-730	250-340	1200	94	2-4
Li-Pos	130-200	300	2000-5000	1000	97	1-2
LiFePO ₄	90-110	220	>300	2000	92	1-2

Tabela 2 – Comparação de tipo de baterias

3.8 Modelização das baterias

Como já referido as baterias terão uma grande relevância no sistema de armazenamento do barramento CC. Será então necessário proceder á sua modelização de forma a compreender e prever o comportamento das mesmas em diferentes regimes de utilização.

Os seu modelos poderão ser variados, os quais poderão ser feitos baseados em modelos experimentais, modelos eletroquímicos, modelos matemáticos ou modelos elétricos.

Mediante o trabalho a realizar será importante a utilização de um bom modelo que possibilite a simulação mais aproximada dos comportamentos da bateria. O modelo eletroquímico e o experimental são limitados e não se adequam a células dinâmicas pois todos os parâmetros não são conhecidos ou são extremamente complicados de obter impossibilitando a análise do estado de carga (SOC). Posto isto será mais propício a utilização dos modelos matemáticos ou elétricos.

O estado de carga (SOC (%)) pode ser visto como a relação entre a tensão máxima esperada aos terminais da bateria e a tensão atual estando a bateria em circuito aberto.

Foi feita um revisão dos vários modelos de baterias com base em [1].

Foi escolhido o modelo DP (*dual-polarization*), por simular com maior precisão a dinâmica do funcionamento das baterias.

O modelo elétrico DP permite representar o comportamento da bateria recorrendo a componentes elétricos. Na figura seguinte, está representado o circuito elétrico que modela o seu comportamento a partir de elementos passivos e ativos. Neste modelo apresentado os componentes passivos são resistências e condensadores enquanto os componentes ativos são as fontes de tensão e correntes controladas. Neste circuito está representado o circuito de tempo de funcionamento e o circuito da característica tensão-corrente.

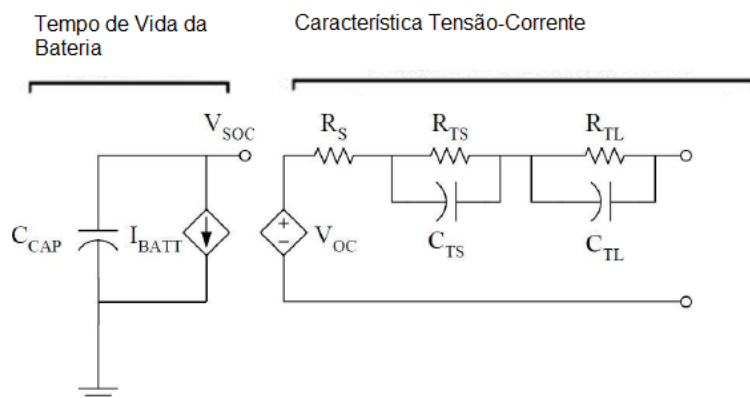


Figura 1 – Modelo de bateria

Do lado esquerdo do modelo, o condensador C_{cap} e a fonte de corrente controlada I_{batt} determinam a capacidade, o estado de carga e o tempo de vida da bateria.

As malhas RC simulam a resposta transitória. A malha $R_{ts}+C_{ts}$ simula os fenômenos de curta-duração enquanto a malha $R_{tl}+C_{tl}$ simula os fenômenos de longa-duração. Para permitir relacionar o estado de carga com a tensão em circuito aberto é utilizada uma fonte de tensão controlada. Este modelo tem a vantagem de permitir prever o funcionamento da bateria, a resposta transitória e o funcionamento em regime permanente, ao mesmo tempo que mostra a dinâmica de todas as características elétricas relevantes

Existe a dependência da tensão de circuito aberto com o estado de carga da bateria, o que explica a necessidade de a incluir no modelo.

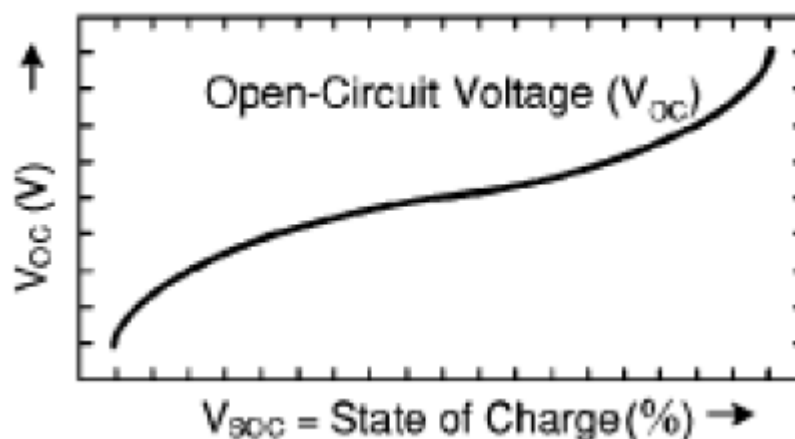


Figura 2 – Tensão da célula e SOC

Para se proceder à simulação do modelo de baterias, utilizaram-se os resultados apresentados em [2]. Os resultados apresentados foram feitos para uma bateria de lítio polímero com 750mAh de capacidade.

$$V_{oc}(SOC) = -1.031 \cdot e^{-35 \cdot SOC} + 3.685 + 0.2156 \cdot SOC - 0.1178 \cdot SOC^2 + 0.3201 \cdot SOC^3$$

$$R_{series}(SOC) = 0.1562 \cdot e^{-24.37 \cdot SOC} + 0.07446,$$

$$R_{Transient_S}(SOC) = 0.3208 \cdot e^{-29.14 \cdot SOC} + 0.04669,$$

$$C_{Transient_S}(SOC) = -752.9 \cdot e^{-13.51 \cdot SOC} + 703.6,$$

$$R_{Transient_L}(SOC) = 6.603 \cdot e^{-155.2 \cdot SOC} + 0.04984,$$

$$C_{Transient_L}(SOC) = -6056 \cdot e^{-27.12 \cdot SOC} + 4475,$$

A determinação do estado de carga é realizada através da “contagem de coloumb”. Neste processo a corrente é integrada ao longo do tempo.

$$SOC[i(t)] = SOC_{inicial} - \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$$

4. Ultra-Condensadores (UC)

São condensadores eletroquímicos que têm uma extraordinária capacidade de armazenamento de energia relativo a seu tamanho quando comparado a condensadores comuns.

Estes são de interesse particular em aplicações a automóveis para armazenamento suplementar para bateria de veículos elétricos.

Em regimes transitórios, os UC conseguem fornecer elevadas correntes de descarga ou receber elevadas correntes de carga. Dessa forma, podem ter grande utilidade no sentido poupar as baterias a esses regimes, prolongando o tempo de vida útil das baterias cujo nº de ciclos carga/descarga é mais reduzido.

Vantagens:

- Grandes taxas de carga/descarga
- Centenas de milhares de ciclos.
- Reversibilidade boa
- Peso Leve
- Eficiência de ciclo alta
- Baixa toxicidade dos materiais

Desvantagens:

- A energia específica (quantidade de energia por Kg) é consideravelmente mais baixa que a de uma bateria eletroquímica
- A tensão varia com a energia armazenada. Para armazenar efetivamente e recuperar energia é necessário controle eletrônico sofisticado, que resulta em perda de energia.

4.1 Modelização dos UC

Tendo em vista que será utilizado ultra-condensadores nesta dissertação será importante a utilização de um modelo elétrico simplista. Após alguma pesquisa o modelo mais assertivo a ser utilizado será o modelo em serie. O respetivo modelo foi baseado em [3] e está exemplificado na seguinte imagem.

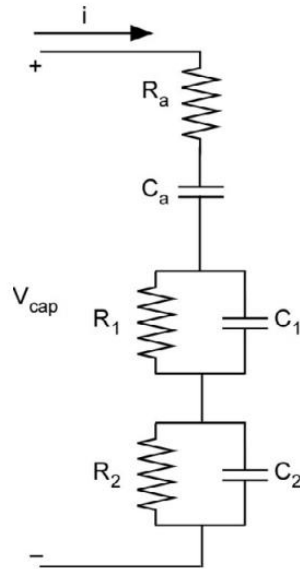


Figura 3 – Modelo de ultra-condensador

Com este modelo será possível extrair os valores através das seguintes expressões.

$$Z(s) = \frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + 1}{B_3 s^3 + B_2 s^2 + B_1 s}$$

Onde,

$$b_3 = R_a C_a R_b C_b R_c C_c$$

$$b_2 = R_a C_a R_b C_b + R_b C_b R_c C_c + R_c C_c R_a C_a + R_c C_c C_a R_b + R_b C_b C_a R_c$$

$$b_1 = R_a C_a + R_b C_b + R_c C_c + R_c C_a + R_b C_a$$

$$B_3 = C_a R_b C_b R_c C_c$$

$$B_2 = C_a R_c C_c + C_a R_b C_b$$

$$B_1 = C_a$$

5. Conversores de potência

Os conversores de potência serão uma componente essencial num sistema de armazenamento de energia. Estes conversores irão possibilitar tanto a conversão de tensão e corrente desejada no barramento como o controlo dessas tensões e correntes.

Os conversores poderão ser caracterizados pela sua característica de conversão de Corrente Alternada ou Corrente Contínua dividindo-se em 4 grupos:

- CA/CC – Corrente alternada em corrente contínua;
- CC/CA – Corrente contínua em corrente alternada;
- CA/CA – Corrente Alternada em corrente contínua de diferente amplitude;
- CC/CC – Corrente Contínua em corrente contínua de diferente amplitude;

Visto o projeto se debruçar sobre um barramento CC e ter em base a potência de baterias o conversor mais usual será o CC/CC. Assim sendo iremos ter um componente que nos irá possibilitar a conversão de uma tensão ou corrente contínua que tem uma determinada amplitude, em outra tensão ou corrente contínua com outra amplitude diferente.

5.1 Método Linear

Este método bastante rudimentar permite a conversão de uma tensão em outra inferior através de um divisor de tensão. Este é realizado pela configuração serie de duas ou mais resistências que irão promover uma resistência abaixo da tensão de entrada. Contudo existem várias desvantagens com este método:

- Apenas possibilita a conversão entre zero e a tensão de entrada;
- Não é bi-direcional;
- Tem uma baixa eficiência uma vez que a potência é dissipada nas resistências;
- A carga terá de ser conhecida e constante;

5.2 Método Conversor comutado

Esta metodologia como o próprio nome indica utiliza comutadores de forma a controlar a tensão e corrente de um conversor. Estes comutadores poderão funcionar numa gama de frequências elevada (de dezenas de Hz a centenas de kHz). Geralmente este processo passa pela carga e descarga de uma bobine de forma controlada. Assim será possível a transferência de potência com perdas reduzidas, uma vez que não existirá resistências. Toda a transferência será feita com bobines, condensadores e comutadores (switches).

5.3 Topologias dos conversores

Os conversores de potência têm uma configuração muito própria e conhecida. Apesar disso poderá ser feita a combinação de 2 ou mais topologias de forma a obter o resultado pretendido. Visto o número de topologias ser variado e muito extenso iremos apenas analisar algumas topologias mais simples, eliminando também todas as variações dentro das mesmas.

Todas as topologias tiveram em vista o livro [4]

Buck (step-down)

O conversor buck trata-se de um conversor abaixador, isto é produz á saída uma tensão inferior á da entrada.

A sua composição é bastante simples e utiliza uma bobine e um transistor comutador como está descrito na seguinte imagem:

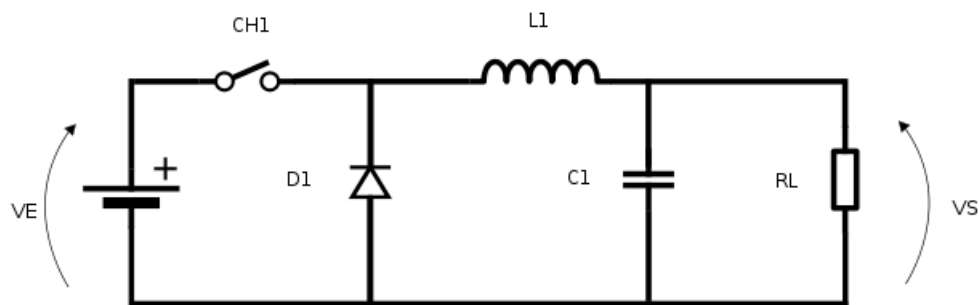


Figura 4 – Topologia do conversor buck

Como já referido este conversor será comutado e desta forma terá 2 modos de operação. Um quando o $CH1$ está ligado e outro quando está desligado. Assim teremos os seguintes modos de funcionamento:

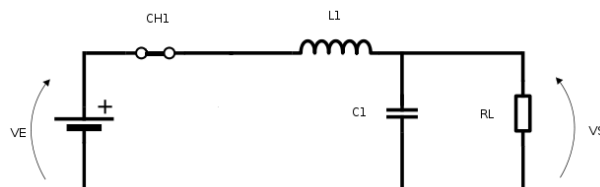


Figura 5 – Conversor buck ligado

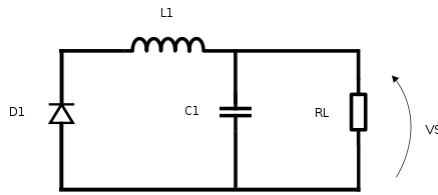


Figura 6 – Conversor buck desligado

Relativamente a estes modos de funcionamento pode-se verificar que quando o interruptor está ligado a bobine L1 irá ser carregada e a carga RL irá ser alimentada. Quando transitamos para o estado desligado a bobine encontra-se carregada e desta forma irá alimentar a carga RL circulado a corrente pelo díodo D1.

A partir deste modo de funcionamento podemos retirar todos os requisitos essenciais para este conversor onde todos os componentes serão considerados ideais.

Duty-cycle da comutação: $D = \frac{V_o}{V_i}$

Indutância da bobine: $L = \frac{(V_i - V_o) \cdot D \cdot T \cdot (D + \frac{V_i - V_o}{V_o} D)}{2I_o}$

Condensador: $C = \frac{T^2 \cdot V_o \cdot (1 - D)}{8 \cdot L \cdot \Delta V_o}$

Boost (step-up)

O conversor boost, tal como o próprio nome indica é Step-Up (elevador). Possui uma tensão de saída sempre superior ou igual à tensão de entrada.

De seguida iremos explicar o seu funcionamento e todos os seus componentes.

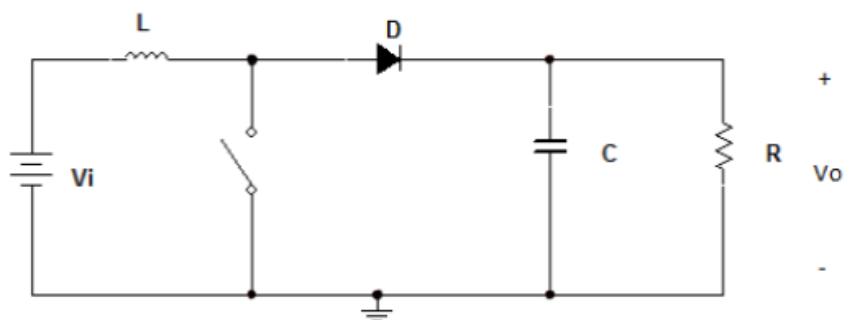


Figura 7 – Topologia do conversor boost

Quando o interruptor se encontra em condução (fechado), o díodo fica inversamente polarizado isolando a saída. A entrada fornece energia à bobine para posteriormente ser descarregada.

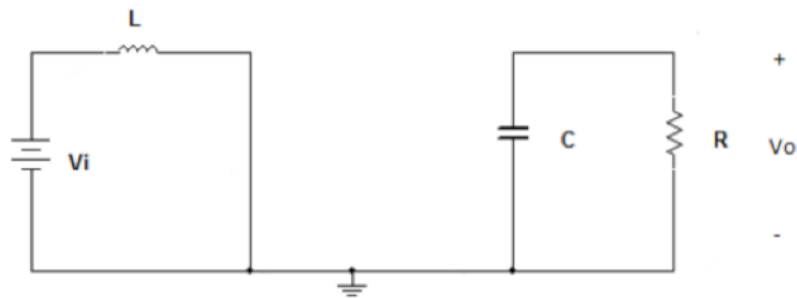


Figura 8 – Conversor boost ligado

É possível traduzir a tensão e a corrente na bobine através das seguintes equações:

$$V_L = L \times \frac{\partial i}{\partial t} = V_i - V_0 \quad \text{e} \quad i_L = \frac{V_i - V_0}{L} \times t + C_2$$

Quando o interruptor está aberto, o díodo permite a condução, fazendo com que o condensador receba a energia armazenada na bobine, provocando um acréscimo de tensão na saída (carga R). Graças à capacidade do condensador C, a tensão mantém-se constante até à seguinte transição de estado.

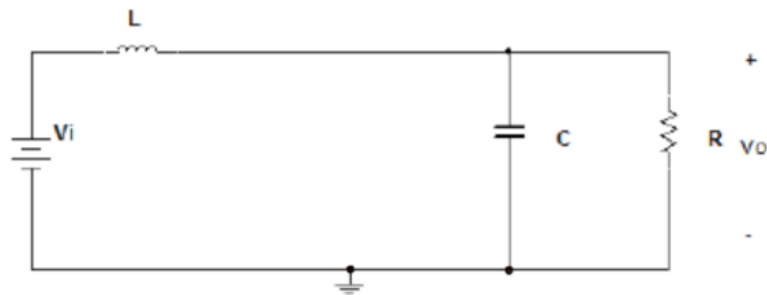


Figura 9 – Conversor boost desligado

Compreendendo este modo de funcionamento podemos extrair as variáveis mais importantes para o dimensionamento do conversor.

Duty-cycle de comutação: $D = 1 - \frac{V_i}{V_o}$

Indutância da bobine: $L = \frac{T \cdot V_o}{2I_o} \cdot D \cdot (1 - D)^2$

Condensador: $C = \frac{D \cdot T \cdot V_o}{R \cdot \Delta V_o}$

Buck-Boost

O conversor Buck-boost trata-se de um conversor quer abaixador como elevador. Assim com este tipo de topologia iremos permitir que a saída se obtenha uma tensão superior ou inferior da tensão de entrada controlando a comutação do interruptor.

Esta topologia irá ter a seguinte configuração:

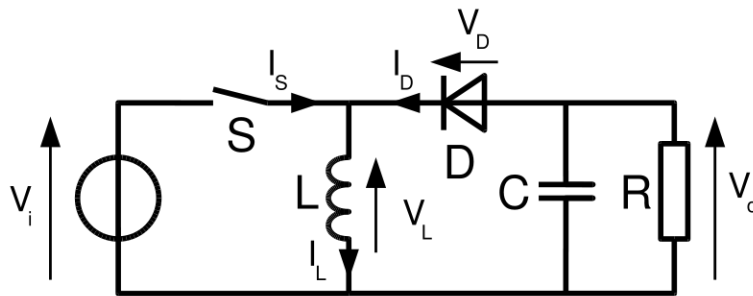


Figura 10 – Topologia do conversor buck-boost

À semelhança dos outros conversores, este também irá ter dois modos de operação descritos nas seguintes imagens:

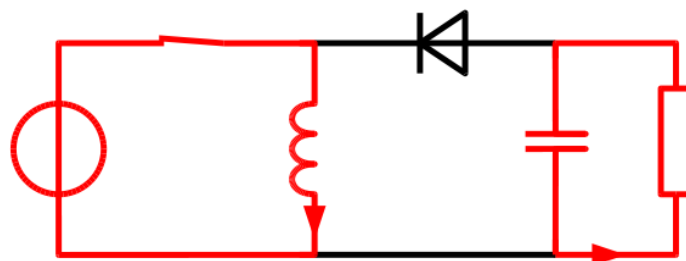


Figura 11 – Conversor buck-boost ligado

Quando o interruptor se encontra ligado a bobine irá ser carregada de forma a posteriormente libertar a sua energia na carga. Enquanto isto o condensador estará a alimentar a carga.

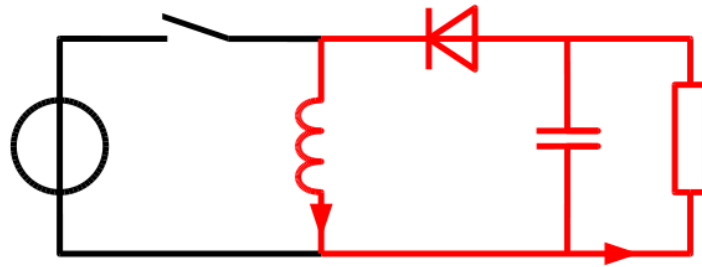


Figura 12 – Conversor buck-boost desligado

Quando o interruptor é desligado a energia armazenada na bobine será descarregada na saída do conversor, tanto alimentando a carga como carregando o condensador de saída.

Com esta topologia conhecida podemos extrair as variáveis do conversor resultando as seguintes equações:

Duty-cycle de comutação:
$$D = \frac{V_o}{V_o - V_i}$$

Indutância da bobine:
$$L = \frac{T \cdot V_o}{2I_o} \cdot (1 - D)^2$$

Condensador:
$$C = \frac{T \cdot D \cdot V_o}{R \cdot \Delta V_o}$$

6. Controlo (DSP)

O controlo é importante para a maioria dos processos para evitar perturbações que degradem o processo global de desempenho do sistema. Os controladores eletrónicos foram introduzidos há muitos anos. Têm atingido um alto nível de sofisticação ao longo dos tempos, devido aos rápidos avanços desenvolvidos pela indústria.

Com o enorme desenvolvimento que tem existido permitiu obter sistemas e acessórios de tecnologia digital acoplada ao microcomputador e com custos cada vez mais reduzidos, o que torna os controladores digitais cada vez mais viáveis. Os vários fatores que tornam um controlador digital atraente são:

- Sensibilidade melhorada, isto é, o controlador é mais precisa;
- É mais confiável, pois o número de componentes do sistema é diminuído e o problema de ruído do sistema pode ser eliminado com sucesso;
- Oferece a capacidade de controlo avançado, tal como capacidade de aprendizagem dos sistemas de controlo;
- Sem desvios e perdas devido ao ruído e a perturbações;
- São mais pequeno e mais leve de que controlos homólogos analógicos, e o consumo de energia são minimizados;
- É geralmente mais barato em comparação com controlos analógicos;
- Oferece flexibilidade nos algoritmos de controlo.

Em resumo, a principal vantagem do DSP é a sua versatilidade. O programa que caracteriza o controlador pode ser modificado sem o *hardware* sofrer qualquer alteração. [5]

Referências

- [1] He, H.; Xiong, R.; Fan, J.; , "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach". *Energies*, 4, 582-598, 2011
- [2] Min Chen; Rincon-Mora, G.A.; , "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance," *Energy Conversion, IEEE Transactions on* , vol.21, no.2, pp. 504- 511, June 2006
- [3] Lisheng Shi; Crow, M.L.; , "Comparison of ultracapacitor electric circuit models," *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE* , vol., no., pp.1-6, 20-24, July 2008
- [4] Mohan, Ned; Undeland, Tore M., Robbins, William P.; , "Power Electronics" Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.. ISBN 0-471-42908-2, 2003
- [5] M. Meenakshi; , "Microprocessor Based Digital PID Controller for Speed Control of D.C. Motor," in *Emerging Trends in Engineering and Technology, 2008. ICETET '08. First International Conference on*, pp. 960-965, 2008