

# Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**FEUP**

## **SISTEMA DE GESTÃO DE BATERIA DE UM VEICULO ELECTRICO**

Estado de Arte

Afonso Lopes  
Carlos Ribeiro  
José Ricardo Soares  
Nuno Curral  
Vasco Sotomaior

Relatório do Trabalho Prático realizado no âmbito da Unidade Curricular  
Electrónica Automóvel do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Novembro de 2011

## Conteúdos

Conteúdos .....	2
Introdução .....	3
Baterias .....	4
Tecnologias de armazenamento de energia .....	4
Armazenamento químico .....	7
Modelos de Baterias .....	10
Comparação das baterias .....	12
Tipologia de controlo e monitorização - proposta de solução .....	14
Unidade de Monitorização das baterias .....	14
Unidade de Controlo das Baterias .....	14
Infraestrutura de Comunicações .....	15
Tipologias de Implementação de BMS .....	15
Proposta de Solução .....	16
Controlador Mestre: .....	23
Balanceamento e carregamento .....	24
Balanceamento activo .....	25
Balanceamento passivo .....	27
Carregamento .....	28
Propostas de Solução .....	29
Conversores de potência .....	30
Conversor AC/DC, topologias .....	30
Conversor DC/DC, topologias .....	34
Referências .....	35

## Introdução

Este documento foi desenvolvido no âmbito da unidade curricular de electrónica automóvel, e tem como principal objectivo expor a pesquisa e a análise realizada do estado de arte de sistemas de gestão de baterias para veículos eléctricos.

Inicialmente é apresentado o estado de arte do sistema global de gestão de bateria e é apresentada uma solução para a sua arquitectura. No seguimento desta exposição são apresentadas as várias tecnologias mais utilizadas nos vários subsistemas constituintes do BMS.

O primeiro subsistema apresentado é naturalmente o módulo de baterias. Diferentes tipos de baterias são analisados no sentido de averiguar a melhor solução para o projecto, baseado nas várias vantagens e desvantagens das tecnologias existentes, sendo depois proposto uma solução.

A tipologia de controlo, os conversores de potência e as tecnologias de balanceamento são outras das questões analisadas no sentido de seleccionar a melhor solução para integrar no sistema.

O documento resume a trabalho de pesquisa realizado e com base nessa análise as soluções são apresentadas.

## Baterias

Existem dois tipos de baterias, que são as recarregáveis e as descartáveis, não sendo estas últimas averiguadas neste documento por não se encaixarem no âmbito do BMS (Battery Manager System) de um veículo elétrico.

As baterias recarregáveis podem ser formadas por uma ou mais células eletroquímicas, e podem ter vários formatos e tamanhos. As baterias utilizam vários produtos químicos tais como, chumbo-ácido, níquel-cádmio (NiCd), de níquel metal hidreto (NiMH), íões de lítio (Li-ion), e de íões de lítio polímero (Li-ion polímero).

As baterias recarregáveis têm menor impacto ambiental do que as baterias descartáveis, tendo um custo inicial mais elevado, mas podem ser recarregadas e usado muitas vezes, pelo que tem custo total de uso muito menor.

## Tecnologias de armazenamento de energia

### Flywheels

*Flywheel energy storage* (FES) funciona acelerando um rotor a uma velocidade muito alta e manter a energia no sistema como energia rotacional. Quando a energia é extraída do sistema, velocidade de rotação do volante é reduzida como consequência do princípio da conservação de energia, normalmente usa eletricidade para acelerar e desacelerar a *Flywheel*



### Vantagens

- Impacto ambiental mínimo.
- Capacidade de armazenamento.
- Carregamento rápido.
- Durabilidade.

### Desvantagens

- Pouca resistência a choques mecânicos.
- Variações na tensão e frequência de saída.
- Efeito giroscópico.
- Segurança.

## Hidrogénio

A eletricidade é a obtida através da combinação do hidrogénio com o oxigénio produzindo vapor de água e libertando energia que é convertida em eletricidade.

O hidrogénio não é uma fonte primária de energia, pois pode ser obtido de diversas fontes energéticas (petróleo, gás natural, eletricidade, energia solar) e não é poluente, o uso do hidrogénio como combustível já é utilizado, em vários protótipos de carros nos países desenvolvidos.

### Vantagens

- Capacidade de armazenamento
- Não poluente
- Maior densidade energética por massa

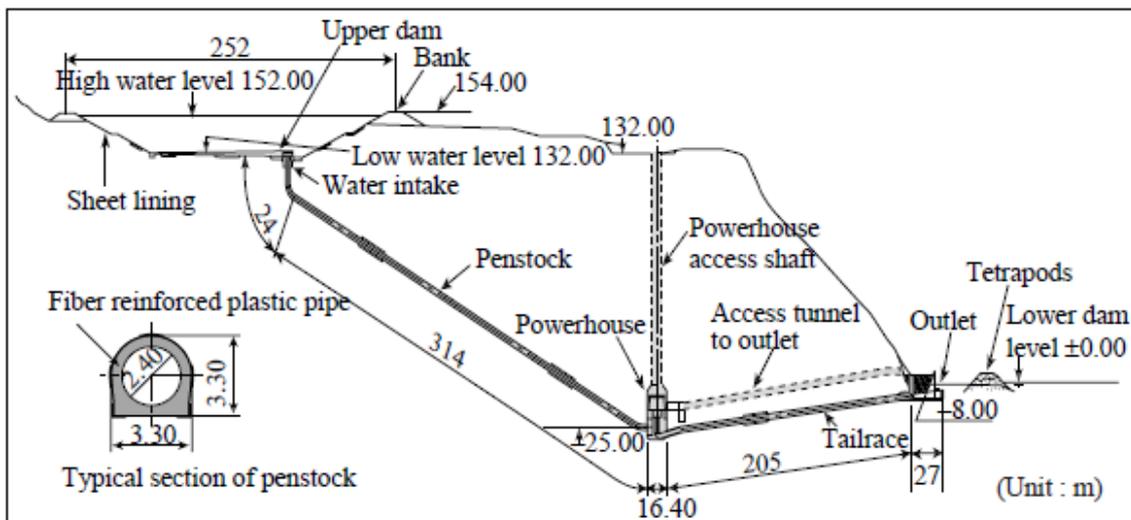
### Desvantagens

- Custos
- Segurança

## Armazenamento Bombeado Hidrelétrico

A energia é produzida através de energia potencial, que é obtida com o armazenamento de água bombeada.

O armazenamento bombeado hidrelétrico é um tipo de geração de energia utilizado por algumas barragens para o balanço de carga. O método armazenamento de energia na forma de água, bombeada de um reservatório menor elevação para uma altitude maior, tirando proveito do baixo custo de eletricidade fora de pico elétrico. Durante os períodos de alta demanda elétrica, a água armazenada é libertada através de turbinas para produzir energia elétrica.



*Seawater Pumped-storage Power Plant, Fujihara*

Em momentos de baixo consumo elétrico, o excesso de capacidade de geração é usado para bombear água para o reservatório superior. Quando há maior consumo, a

água é libertada de volta para o reservatório inferior através de uma turbina, gerando eletricidade. Normalmente usam-se turbinas reversíveis a atuar como bomba e turbina.

Tendo em conta as perdas de evaporação da água, e as perdas de conversão, de aproximadamente 70% a 85% da energia elétrica utilizada para bombear a água para o reservatório mais elevado pode ser recuperado. A técnica é atualmente a melhor na relação custo-benefício, podendo armazenar grandes quantidades de energia elétrica numa base operacional, mas os custos de capital e a presença de geografia apropriada são fatores críticos de decisão.

#### **Vantagens**

- Capacidade de armazenamento
- Durabilidade elevada

#### **Desvantagens**

- Impacto ambiental
- Custo/tempo da construção
- Dependência de sistema de geração ou rede elétrica

#### **Ar Comprimido (CAES)**

O sistema CAES (Ar Comprimido Energy Storage) é uma maneira de armazenar a energia gerada para utilizar posteriormente, isto é, a energia gerada durante os períodos de baixo consumo de energia é armazenada podendo ser libertada para períodos de maior consumo (picos), este armazenamento é efetuado com a compressão do ar e a sua eficiência de armazenamento é muito influenciada pela temperatura, pelo que existem três métodos, pode ser adiabático, diabático, ou isotérmica. Para este processo de armazenamento é muitas vezes utilizada uma caverna subterrânea criada por mineração ou utilizando uma mina abandonada.

#### **Vantagens**

- Limpa
- Eficiente
- Econômica

#### **SMES**

Supercondutores de armazenamento de energia magnética são sistemas que armazenam energia no campo magnético criado pelo fluxo de corrente contínua, numa bobina supercondutora que é arrefecido a criogénico, a uma temperatura abaixo de sua temperatura crítica supercondutora. Este sistema é tipicamente constituído por três partes: bobina supercondutora, sistema de condicionamento de potência, e sistema arrefecido a criogénico. Com a utilização da bobina supercondutora, a corrente não irá cair e a energia magnética pode ser armazenada por um tempo indeterminado, podendo ser libertada de volta para a rede, descarregando a bobina.

#### **Vantagens**

- Carga e descarga.
- Potencia.
- Rendimento.

#### Desvantagens

- Custo.
- Refrigeração.

### Armazenamento químico

A bateria é um dispositivo que armazena energia química e a torna disponível na forma de energia elétrica. A capacidade de uma bateria de armazenar carga é expressa em Ampère-hora, quanto maior a quantidade de eletrólito e maior o eletrodo da bateria, maior a capacidade da mesma. Por causa das reações químicas dentro das pilhas, a capacidade de uma bateria depende das condições da descarga tais como o valor da corrente elétrica, a duração da corrente, a tensão nos terminais da bateria, a temperatura, e os outros fatores.

#### Níquel-cádmio (NiCd)

A bateria de níquel cádmio (NiCd) foi o primeiro tipo de pilha ou bateria recarregável a ser desenvolvida, o cátodo coberto de Hidróxido de níquel, e o ânodo coberto de material sensível ao cádmio encontram-se no mesmo recipiente, ambos isolados por um separador, e estão imersos numa substância eletrolítica, que conduz iões, geralmente uma solução de Hidróxido de potássio (KOH).

#### Vantagens

- Preço.
- Leve.
- Tensão constante.

#### Desvantagens

- Poluente (cádmio).
- Efeito de memória.
- Resistência temperatura.

#### Pilhas Alcalinas

A pilha alcalina em uma voltagem de 1,5 V e não é recarregável. É indicada para equipamentos que requerem descargas de energia rápidas e fortes. A pilha alcalina é composta de um ânodo de zinco poroso imerso em uma solução alcalina de hidróxido de potássio ou de hidróxido de sódio, e de um cátodo de dióxido de manganês compactado, envoltos por uma capa de aço niquelado, além de um separador feito de papel e de um isolante de nylon.

#### Vantagens

- Custo baixo.
- Vulgares.
- Encontra-se com facilidade.
- Durabilidade.
- Potência

## Desvantagens

- Poucos modelos recarregáveis.
- Necessários suportes de utilização.

## Bateria de Chumbo

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 de 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.

## Vantagens

- Baixo custo.
- Resistência á temperatura.
- Durabilidade.

## Desvantagens

- Pesada.
- Tempo carga/descarga.
- Diminuição da voltagem com uso.

## Níquel Hidreto Metálico (NiMH)

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 elétrodo negativo, ao invés de cádmio utilizado nas baterias de níquel cádmio. O elétrodo de hidreto metálico apresenta uma maior densidade de energia que um elétrodo de cádmio, portanto a massa de material ativo para o elétrodo negativo usado numa bateria de níquel-hidreto metálico pode ser menor, que a usada em baterias de níquel cádmio. Isto também permite que se possa utilizar uma maior quantidade de material ativo para o elétrodo positivo, o que resulta numa maior capacidade ou tempo de descarga para esta bateria.

## Vantagens

- Cargas/descargas.
- Ciclo de vida.
- Potencial energético.

- Tempo de recarga.
- Resistência á temperatura.

#### Desvantagem

- Custo.

#### Bateria de Gel

As baterias de gel são baterias eletroquímicas da família das baterias VRLA (*valve-regulated lead-acid*) que têm o seu eletrólito sob uma forma de gel, e o ácido sulfúrico é misturado com fumo de sílica, tornando assim o produto resultante numa massa gelificada e imóvel. Estas baterias eliminam as evaporações ou derrames do eletrólito e têm uma maior resistência a temperaturas extremas, bem como a impactos violentos e à vibração. Quimicamente este tipo de baterias tem a mesma estrutura das baterias húmidas de ácido-chumbo, com a exceção da substituição do antimónio presente nas placas de chumbo pelo cálcio, isto permite preservar as características mecânicas da bateria, assim como a reduzir a possibilidade de fugas de gás.

#### Vantagens

- Resistência à temperatura.
- Resistência choque
- Resistência vibrações.
- Não têm evaporação eletrolítica

#### Desvantagens

- Preço.

#### Zinco-ar

As baterias de zinco-ar são de dois tipos: não recarregáveis (pilhas) e as recarregáveis mecanicamente (células de combustível). Estas baterias eletrolíticas que funcionam por meio da oxidação do zinco ao ar atmosférico, possuem altas densidades energéticas e são relativamente fáceis de produzir. O ânodo é formado por uma massa de partículas de zinco, o qual se encontra saturado com um eletrólito, e o gás de oxigénio (O<sub>2</sub>) do ar atmosférico reage por sua vez no cátodo de modo a formar iões hidroxilos que migram para a referida pasta de zinco de modo a formar zincato, ou  $Zn(OH)_2$ . Isto dá origem à libertação de eletrões que viajam para o cátodo, ao mesmo tempo em que o zincato decai para óxido de zinco e que água regressa ao eletrólito, tanto a água como os hidroxilos do ânodo são reciclados no cátodo, pelo que a primeira não é consumida.

As baterias de zinco-ar possuem características das células de combustível bem como das baterias normais: O zinco é o combustível, a taxa de reação pode ser regulada através da variação do fluxo de ar, e a pasta oxidada à base de zinco/eletrólito pode ser substituída por uma mistura nova.

## Vantagens

- Durabilidade
- Densidade energética

## Desvantagens

- Custos
- Tecnologia

## Lítio

As baterias de lítio são células primárias que têm ânodos de lítio metálico. A primeira bateria de lítio começou com G.N. Lewis em 1912, mas somente a partir de 1970 as primeiras baterias de lítio ficaram disponíveis comercialmente. As tentativas de desenvolver baterias recarregáveis de lítio falharam devido a problemas de segurança devido à instabilidade do metal de lítio, durante o carregamento. Só em 1991, a Sony Corporation comercializou a primeira bateria de íons de lítio, após comprovada a segurança, em que a bateria não usava ânodos de lítio metálico usando íons de lítio. As baterias de íons de lítio têm uma densidade de energia inferior às de metal de lítio.

A bateria Li-ion (íons de lítio) em que os íons de lítio se movem eletrodo negativo para o eletrodo positivo durante a descarga, e fazem o trajeto oposto na recarga, o custo, o desempenho e segurança dependem do tipo de bateria de íons de lítio.

## Vantagens

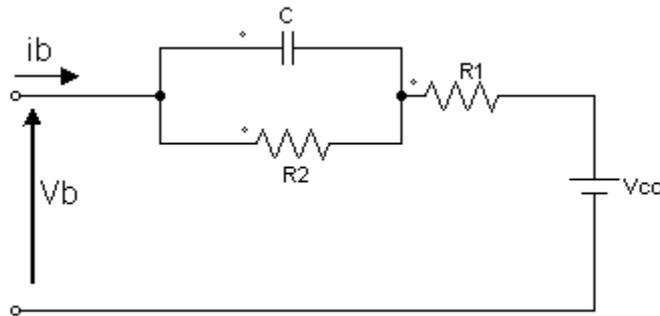
- Proporcionam capacidades mais elevadas.
- Baterias mais leves comparadas com as outras.
- Têm o dobro da capacidade das baterias de níquel.
- Para efetuar o carregamento da bateria não é necessário, a descarga máxima, nem carregamento total.
- Carga Muito Maior
- Não é preciso carregar antes de usar pela primeira vez.
- Não existe o efeito memória, ou seja, a bateria não "vicia".

## Desvantagens

- Tempo de vida, relacionados com níveis de carga elevada e temperaturas elevadas.
- A resistência interna faz com que a tensão caia em carga.
- Requisitos de segurança para evitar sobreaquecimento ou sobrecarga, pois existe o risco de incêndio ou explosão.
- Preço

## Modelos de Baterias

O modelo de baterias mais simples é constituído por uma resistência e por um condensador, pelo que vamos utilizar o circuito equivalente de Thévenin para estudar a capacidade de carga e de descarga.

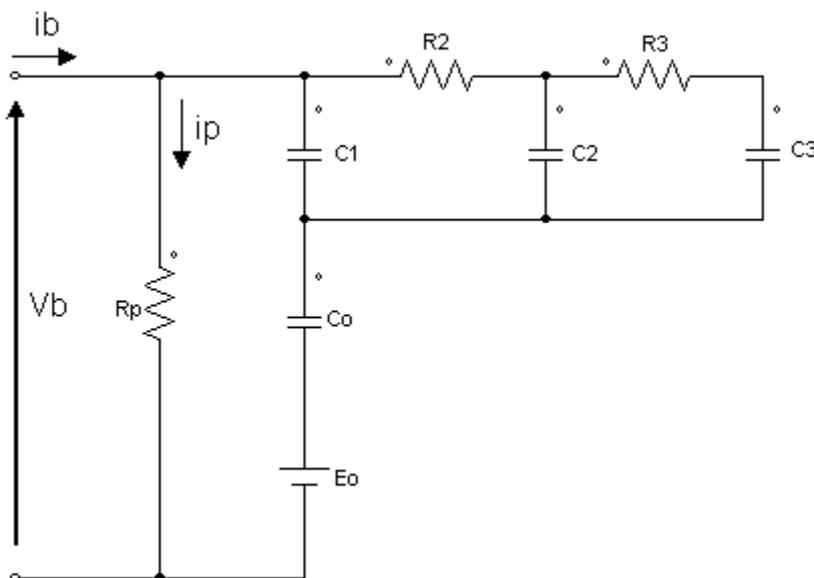


Circuito equivalente de Thévenin

Este modelo permite o estudo do comportamento da tensão em baterias durante o seu ciclo de vida, a tensão em circuito aberto ( $V_b$ ), a resistência interna ( $R_1$ ) e a tensão em sobretensão, dada pela combinação em paralelo da resistência  $R_2$  e do condensador  $C$ . Este circuito só nos deixa simular os principais elementos que condicionam o funcionamento das baterias, pois considera-os constantes quando na realidade dependem de:

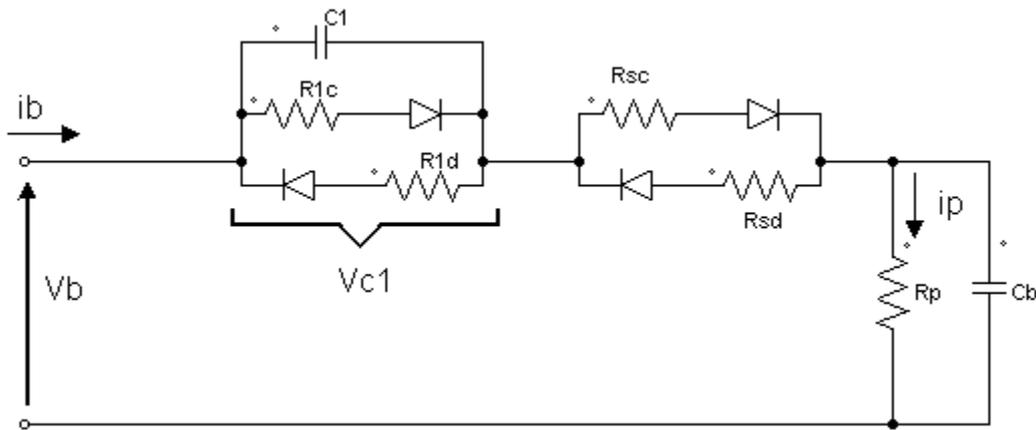
- Estado de carga.
- Capacidade de armazenamento da bateria.
- Taxa de carga e de descarga.
- Temperatura ambiente.

Este modelo como é ineficiente, sendo necessário usar um mais completo que permita uma melhor caracterização dos fenómenos que ocorrem durante o funcionamento das baterias, pelo que vamos utilizar o modelo a seguir.

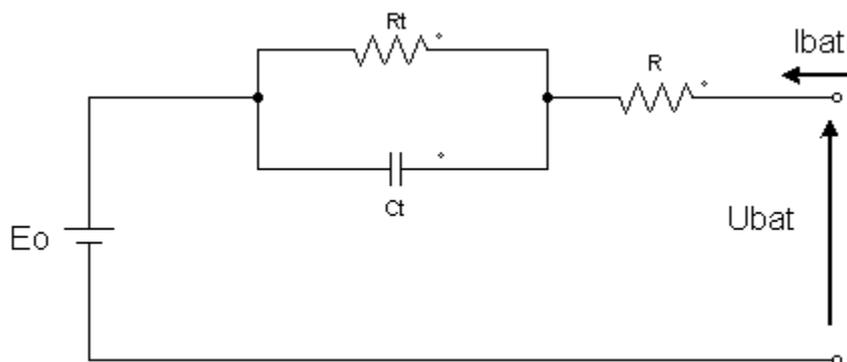


Modelo elétrico linear de uma bateria.

Este modelo não tem em consideração variações na temperatura, taxas de carga e de descarga, utilizando componentes lineares para descrever a auto descarga ( $R_p$ ) e várias malhas  $RC$  para representar a sobretensão. Neste modelo a simulação torna-se bastante pesada, pelo que se utilizam os seguintes modelos:



Modelo de carga e descarga de uma bateria.



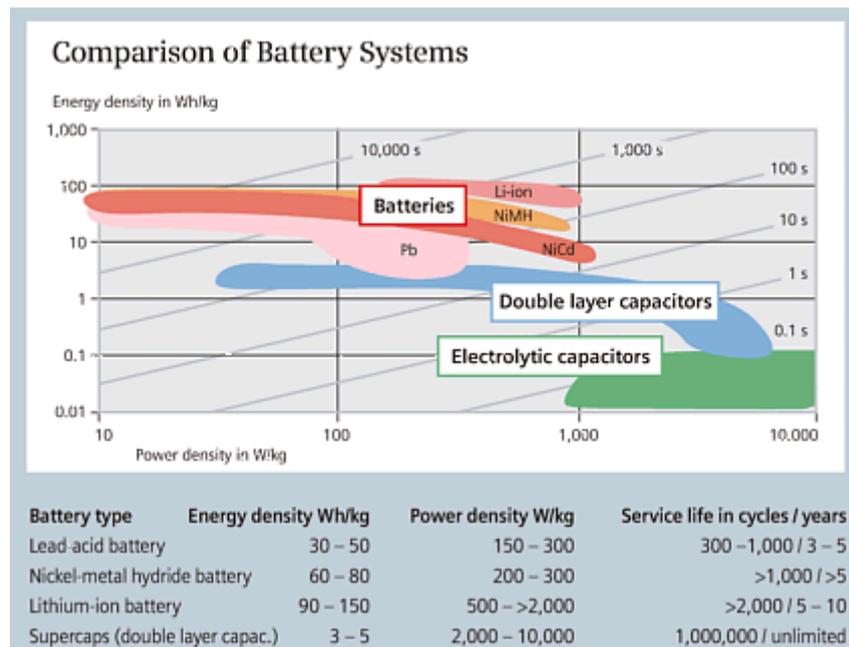
Aproximação de primeira ordem do modelo de uma bateria.

O modelo de carga e descarga de uma bateria os componentes de  $V_{c1}$  representam as sobretensões, as resistências  $R_{sc}$  e  $R_{sd}$  a resistência interna e  $R_p$  a resistência associada à autodescarga, o condensador  $C_b$  simula a capacidade da bateria. Este modelo produz resultados satisfatórios, mas são necessários vários parâmetros que são obtidos através de testes físicos à bateria, o que nem sempre é possível.

O de aproximação de primeira ordem do modelo de uma bateria tem uma tensão de circuito aberto ideal, definida em relação ao estado de carga da bateria, SOC. Esta relação é realizada recorrendo a valores tabelados, a resistência  $R$  é à resistência interna da bateria, e a malha RC representa a histerese para descrever o comportamento da bateria durante transitórios. Este modelo é mais preciso, mas é necessário determinar  $C_t$  e  $R_t$  como função da corrente de carga, do SOC e da temperatura, normalmente utiliza-se a estimações através do método dos mínimos quadrados e a colocação dos resultados em tabelas lidas durante a simulação, não garantindo a validade dos valores obtidos durante o tempo de vida da bateria.

## Comparação das baterias

Devido às desvantagens do hidrogénio, que necessita de cuidados especiais na sua manipulação, pois é um material perigoso, não vai ser utilizado, pelo que nos vamos concentrar nas baterias. Na figura seguinte demonstra a comparação de vários sistemas de baterias:



**Tabela comparativa de células recarregáveis**

Dado	Chumbo-ácida	NiCd	NiMH	Li-Ion
Densidade energética	Baixa	Baixa	Média	Alta
Características de estocagem	Precisam ser carregadas	Boas	Boas	Boas
Perda de carga sem uso	5% / mês	20% / mês	30% / mês	10% / mês
Vida útil	Baixa	Longa	Longa	Média / Longa
Velocidade de carga	Lenta	Lenta ou rápida	Lenta ou rápida	Lenta
Restrições ambientais	Sim	Sim	Não	Não
Custo	Baixo	Médio	Médio / Alto	Alto
Tolerância de sobrecarga	Alta	Média	Baixa	Baixa

Depois de efetuado um breve estudo as baterias, decidimos utilizar a família de baterias de lítio pelas suas características, tais como potencia, autonomia, e tempo de carga.

Das baterias de lítio escolheria as “*lithium-titanate battery*”, mas estas ainda se encontram em desenvolvimento, pois estas efectuam um carregamento mais rápido, pelo que iremos escolher as “*Lithium-ion polymer batteries*”, pois estas tem uma eficiência de carga/descarga de 99.8%, e tem maior capacidade de corrente de descarga em relação a outras baterias de lítio.

## Tipologia de controlo e monitorização - proposta de solução

O sistema de gestão de baterias BMS pode ser dividido em 3 módulos, funções que tem de desempenhar:

- 1) Unidade de Monitorização das Baterias
- 2) Unidade de Controlo das Baterias
- 3) Infraestrutura de Comunicações

### Unidade de Monitorização das baterias

É responsável por determinar o estado de cada célula, calculando o SOC (State of Charge).

O SOC é determinado fazendo integrar o valor da corrente medida pelo decorrer do tempo (influenciada por muitos fatores que condicionam o desempenho das células) e subtraindo esse resultado pela capacidade máxima que bateria tem quando está completamente carregada.

É responsável também pela aquisição dos sinais a medir (tensão, corrente temperatura), e respetiva multiplexagem, de modo a rentabilizar melhor a utilização de dispositivos como conversores A/D.

É responsável também pela definição dos limites de operação das células, como por exemplo um limite máximo de temperatura, para o qual as respetivas células devem ser desligadas.

É também responsável por fornecer os sinais de controlo à "Unidade de Controlo das Baterias".

São as referências/entradas desse sistema, para o qual ativará os circuitos de potência, circuitos de proteção ou também de carga/descarga.

### Unidade de Controlo das Baterias

É responsável por todos os circuitos de potência.

Fornecer todos os sinais de controlo que envolvem o processo de carregar as baterias e também o controlo/balanceamento célula a célula.

As funções desta Unidade são:

- Controlar a tensão e corrente do circuito de carga que alimenta a bateria
- Conseguir um balanceamento célula a célula, de forma a igualar um mesmo valor de carga em todas as células que constituem a bateria
- Isolar a bateria durante condições de falha ou de alarme (por exceder limites excedidos que foram indicados pelo utilizador)
- Conseguir aproveitar a energia da travagem regenerativa para as baterias (DC/DC reversível)
- Conseguir rejeitar a energia da travagem regenerativa quando a bateria está completamente carregada.

## Infraestrutura de Comunicações

Normalmente é implementada uma rede CAN que permite interagir com todos os elementos que constituem o sistema BMS.

No entanto podem ser usadas outras configurações.

## Tipologias de Implementação de BMS

- Centralizada
- Distribuída
- Modular

### Centralizada:

Existe uma Unidade de Controlo Central (Mestre) que implementa todas as funções. Retira a necessidade de existir uma infraestrutura de comunicações, por existirem ligações ponto-a-ponto (cablagem) em cada célula.

### Distribuída:

Existe um escravo associado a cada célula que a monitoriza, balanceia e também comunica com uma entidade Mestre.

Traz fiabilidade ao processo, mas exige um elevado número de circuitos/ placas, igual ao número de células.

### Modular:

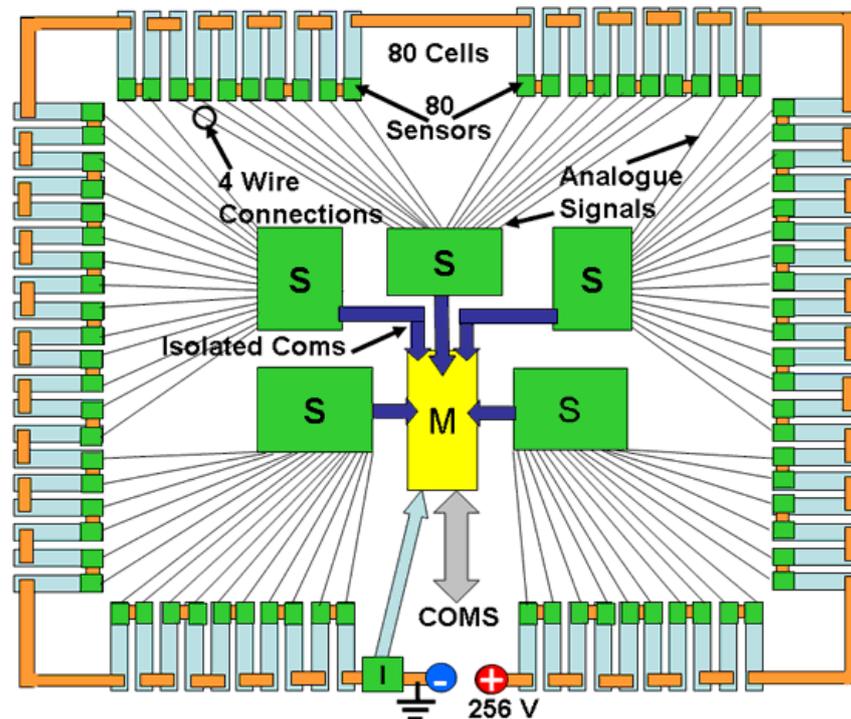
Existem entidades Escravo, que controlam várias células, permitindo uma organização em módulos.

Estes escravos comunicam com o Mestre e este, recolhendo a informação de todos, tem acesso ao estado global da bateria.

Tem a vantagem de ter escravos que podem estar associados a mais do que uma célula (melhor que Distribuída).

A desvantagem reside nas comunicações Mestre-Escravo, que são difíceis de implementar num automóvel.

## Proposta de Solução



De todas as tipologias, a solução mais prática deverá ser a Modular.  
Permite que existam Escravos, responsáveis por módulos – nº limitado de células.

Fazem a monitorização e reportam-na à entidade Mestre.

Escravos:

### Compra de um subsistema "dedicado"

Existem no "mercado" sistemas já integrados que executam as funções de monitorização/proteção de um nº limitado de células em série.

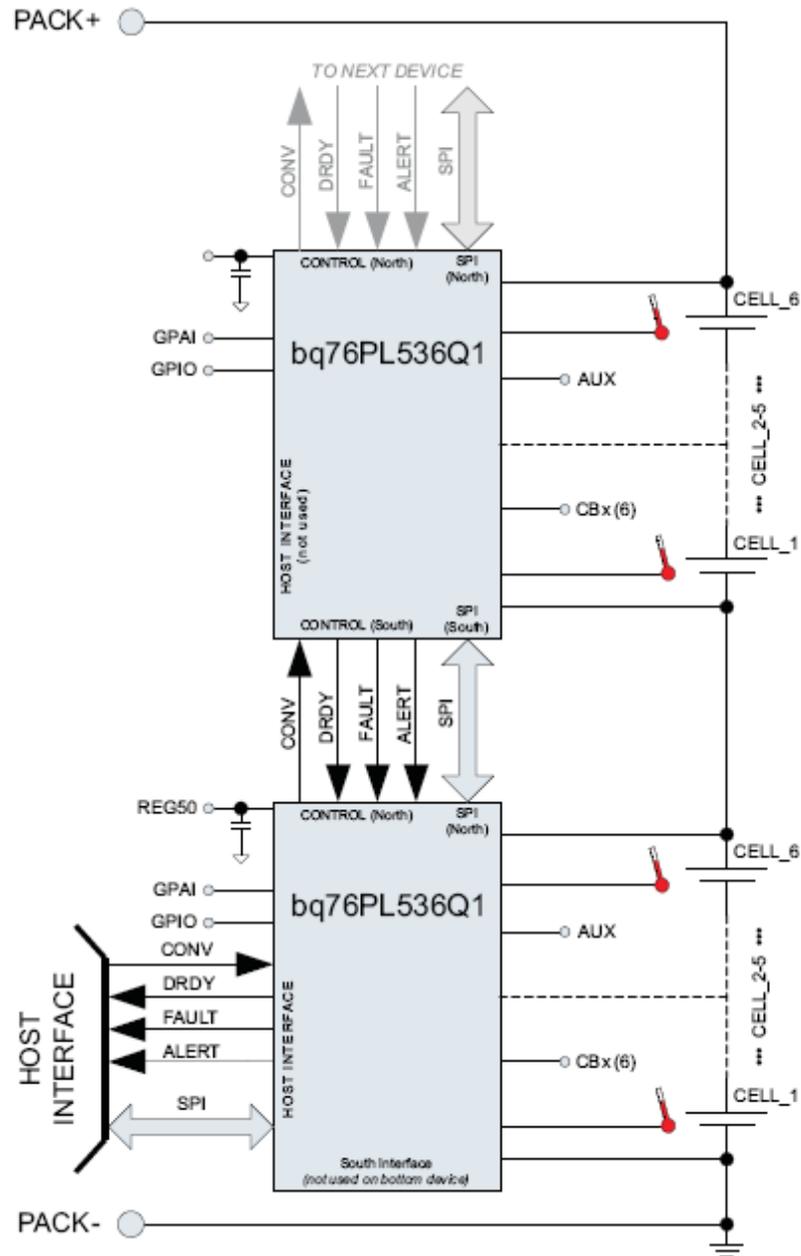
## FEATURES

- **3 to 6 Series Cell Support, All Chemistries**
- **Hot-Pluggable**
- **High-Speed SPI for Data Communications**
- **Stackable Vertical Interface**
- **No Isolation Components Required Between ICs**
- **Qualified for Automotive Applications**
- **Temperature Range –40°C to 105°C**
- **High-Accuracy Analog-to-Digital Converter (ADC):**
  - **±1 mV Typical Accuracy**
  - **14-Bit Resolution, 6-µs Conversion Time**
  - **Nine ADC Inputs: 6 Cell Voltages, 1 Six-Cell Brick Voltage, 2 Temperatures, 1 General-Purpose Input**
  - **Dedicated Pins for Synchronizing Measurements**
- **Configuration Data Stored in ECC-OTP Registers**
- **Built-In Comparators (Secondary Protector) for:**
  - **Over- and Undervoltage Protection**
  - **Overtemperature Protection**
  - **Programmable Thresholds and Delay Times**
  - **Dedicated Fault Output Signals**
- **Cell Balancing Control Outputs With Safety Timeout**
  - **Balance Current Set by External Components**

Este integrado *bq76PL536-Q1* tem um funcionamento semelhante aos anteriores.

Permite ligar menos células: 3 a 6, apresenta vantagens na infraestrutura de comunicações.

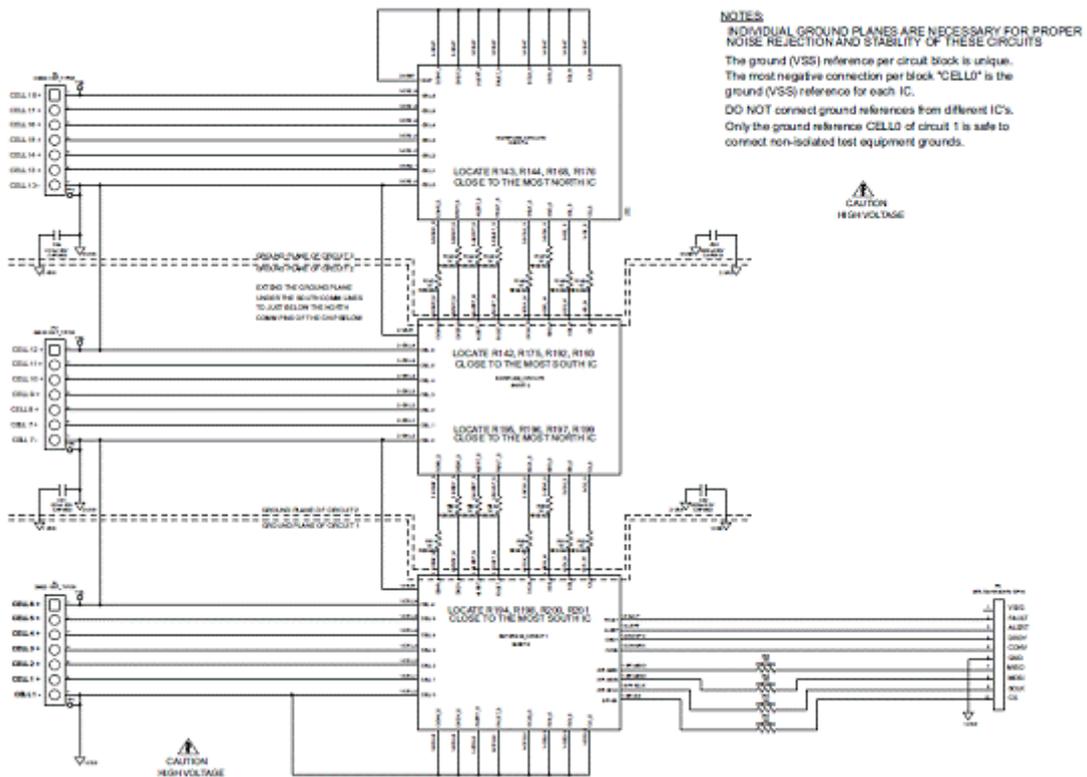
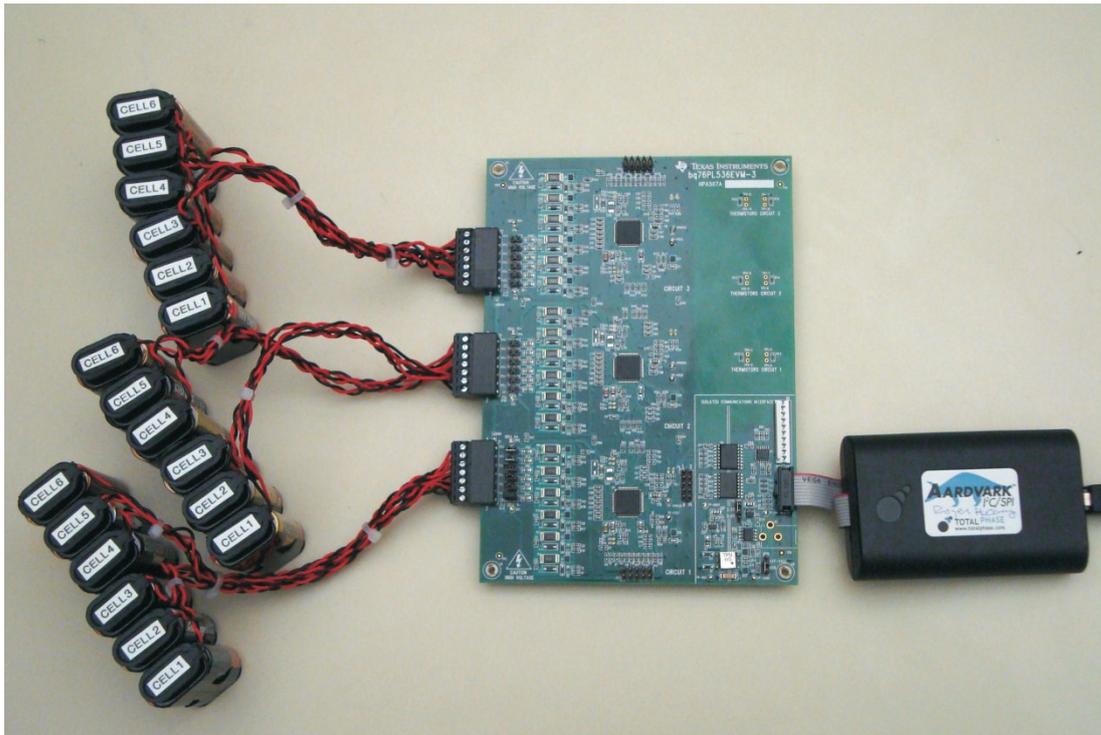
Tem a vantagem de permitir que vários integrados possam ser "empilhados" verticalmente num barramento comum de comunicações SPI.



O fabricante oferece um módulo de avaliação "**bq76PL536 EVM**".

Tem três bq76PL536-Q1 já empilhados verticalmente numa placa "impressa" PCB, o que permite a ligação de 18 células.

Este módulo oferece um kit de programação dos IC's e também um software de teste, que permite a amostragem do funcionamento do módulo.



Uma solução seria a utilização do módulo **bq76PL536 EVM**.

No entanto, embora tenha uma placa PCB já preparada para a aplicação de células numa bateria de um ambiente automóvel, o funcionamento desta é de grande complexidade.

Uma melhor solução passaria por um integrado que fosse mais fácil de utilizar.

## DS 2438 - Maxim

Este integrado fornece várias funções desejáveis numa unidade de Monitorização de baterias:

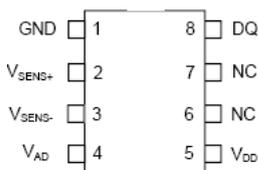
- Atribuir um endereço a um IC
- Um sensor de temperatura interno que torna desnecessária a existência de termístores em baterias;
- Dois conversores A/D para medir a tensão e corrente na célula.
- Um acumulador que interpreta as cargas/descargas de corrente, com base numa tensão medida entre o neutro da bateria e o neutro da fonte que alimenta o IC. Essa tensão é monitorizada e integrada.

A informação é transmitida numa interface de 1-Wire, pelo que para fazer a comunicação com o uControlador Central (Mestre), precisa apenas de 1 fio (mais o GND)

Desta forma, é possível ter informação de cada célula que constitui a bateria, sendo que cada célula irá consistir apenas em 3 conectores: a tensão da célula e o correspondente neutro, e a interface 1-Wire.

Como é possível endereçar cada IC, vários integrados podem existir no mesmo barramento 1-Wire.

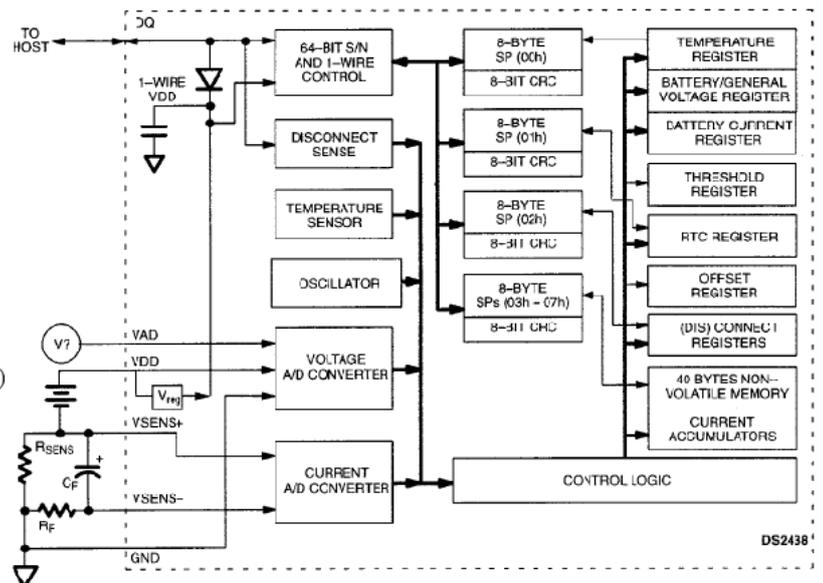
No entanto, as características do conversor A/D têm uma limitação até 10.23V, pelo que à partida, só poderiam ser ligados grupos com máx de 2 células do tipo Li-On ou então grupos com o máx. de 6 células do tipo Niquel.



DS2438Z, DS2438AZ  
8-Pin SOIC (150-mil)

### PIN DESCRIPTION

DQ	- Data In/Out
VAD	- General A/D input
VSENS+	- Battery current monitor input (+)
VSENS-	- Battery current monitor input (-)
VDD	- Power Supply (2.4V to 10.0V)
GND	- Ground
NC	- No connect



Este IC apresenta um funcionamento mais simples que o **módulo bq76PL536 EVM** da Texas pelo que representaria uma melhor solução.

Contudo, este IC não está projetado para aplicações automóveis, apenas está preparado para aplicações com ambientes menos “agressivos” como fazer a monitorização da bateria de um telemóvel ou de um computador portátil.

Para preparar este IC para o ambiente automóvel, seria necessário projetar circuitos de isolamento (ex. recorrendo a isoladores óticos).

Mas esse tipo de isolamento representaria um custo acrescido para o projeto, pelo que não seria de todo uma solução viável a aplicação deste tipo de IC's num automóvel.

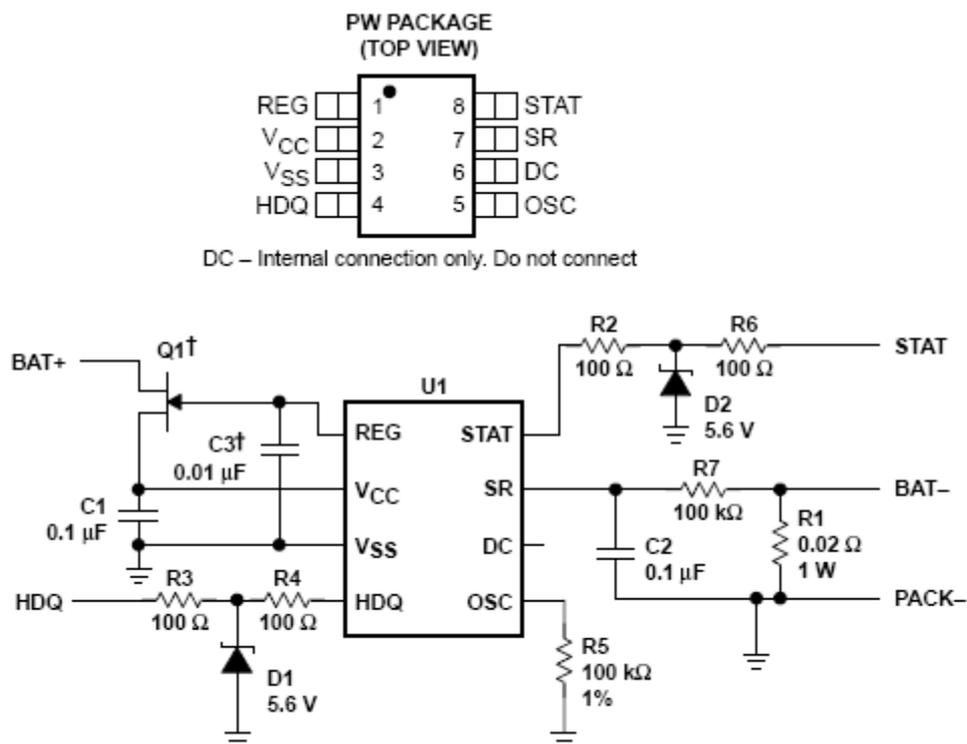
No entanto, numa perspetiva de aprendizagem e também de familiarização com o funcionamento de IC's de monitorização de células, o integrado MAXIM DS 2438 é proposto para o projeto.

### BQ 2019 – Texas Instruments

Este integrado não oferece as mesmas funcionalidades que o Maxim DS2438.

Tem a desvantagem de, para além de não medir a tensão da célula, permite ligar apenas 1 célula de Li-On ou então um grupo com o máx de 3 células de Niquel.

Este integrado não serve para o projeto.



† Q1 and C3 are omitted and V<sub>CC</sub> is connected to BAT+ for single cell lithium ion applications

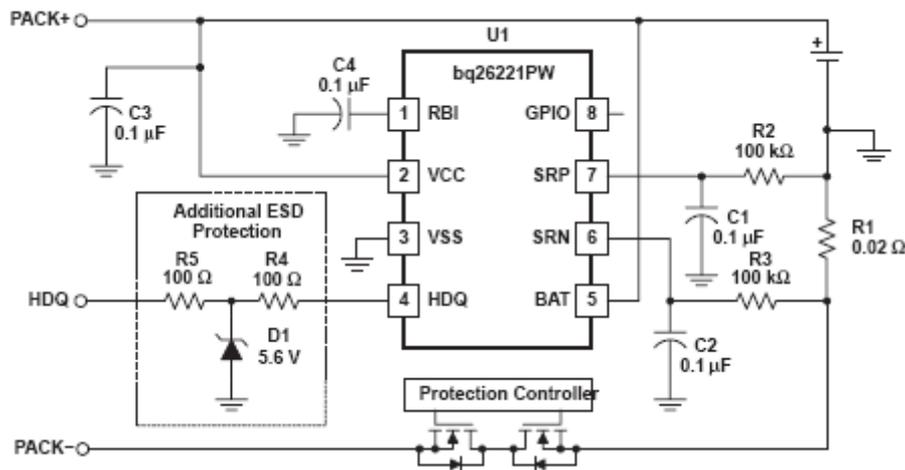
## BQ 26221 – Texas Instruments

Este integrado já oferece as mesmas funcionalidades que o Maxim DS2438.

Mede a tensão, temperatura e corrente.

No entanto, não tem a capacidade de endereçamento que o Maxim DS2438 oferece, de modo a ter vários IC's numa linha partilhada de comunicações.

A impossibilidade de ligar vários IC's deste tipo na mesma linha de comunicações 1Wire faz com que cada BQ26221 tenha de ter a sua própria linha de comunicações, independente dos restantes.



O integrado **BQ 26221** é proposto para o projecto.

## Controlador Mestre:

Como cabe ao Controlador Mestre o acionamento/controlo dos circuitos de potência dos Conversores AC/DC ou dos conversores DC/DC, há que ter em conta o nº de canais PWM que este circuito terá de ter.

Também é preciso atender ao nível de carga de processamento que esta entidade terá de receber/controlar dos vários escravos que terá de coordenar.

É responsável também pela execução da tarefa de balanceamento e também pela proteção das células, com base na informação recebida pelos escravos.

No entanto, cada célula vai estar necessariamente associada a um nº de interruptores.

Surge a necessidade do Mestre conseguir atuar sobre os vários interruptores, de maneira a conseguir ligar/desligar uma determinada célula e também controlar o circuito de balanceamento.

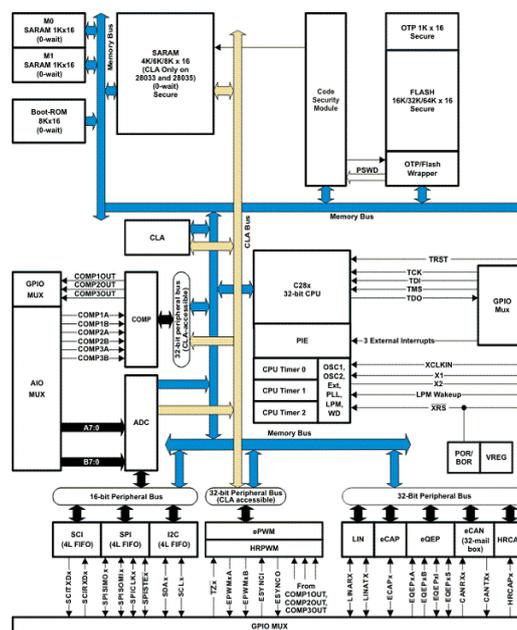
O controlo de cada interruptor poderia ser feito por uma saída do tipo digital (ON/OFF).

Para um número tão elevado de saídas digitais requeridas, surge a necessidade de um módulo de saídas digitais que atenda a este propósito.

Em termos da compatibilidade de comunicações, este uControlador tem todas as capacidades para comunicar com os IC's de monitorização mais simples que foram propostos (Maxim DS2438 + Texas bq26221), na medida em que a interface de comunicação com estes dispositivos é feita com base numa porta digital.

Para o IC de monitorização mais complexo, módulo EVM bq76pl536, a comunicação é feita num barramento SPI, pelo que, o uControlador teria que implementar esse tipo de comunicações.

O uControlador proposto é o: TMS320F28035 (DSP's do laboratório I103)



## Balanceamento e carregamento

Num sistema BMS para além da monitorização e proteção das baterias, há que garantir que estas vão trabalhar à sua potência máxima quando preciso e que o seu tempo de vida é prolongado ao máximo. Para garantir estes objetivos será necessário que o sistema inclua as funções:

**Proteção das células** – Se a bateria operar fora das condições para as quais foi projetada vai-se estragar e os custos de substituição da mesma podem ser elevadíssimos. Sendo que o objetivo é que estas baterias operem no interior de um veículo em que as condições são hostis, será necessário ter muita atenção a este ponto.

**Controlo do carregamento** – O carregamento indevido das baterias vai estragá-las.

**Determinação do estado de carga** – É necessário conhecer o SOC (state of charge) de cada célula para garantir o balanceamento das baterias para um desempenho ótimo.

**Determinação do estado de saúde** – É necessário conhecer o SOH (state of health) de cada célula pois esta pode estar a contribuir para uma má performance do sistema, ou necessitar de manutenção ou de ser substituída.

**Balanceamento das células** – Para prolongar o tempo de vida das células é feito um balanceamento das células na medida em que se compensa as células mais fracas igualando a carga em todas as células. Deste modo as células mais fracas não estarão sujeitas a um maior *stress* que conduziria a que se estragassem.

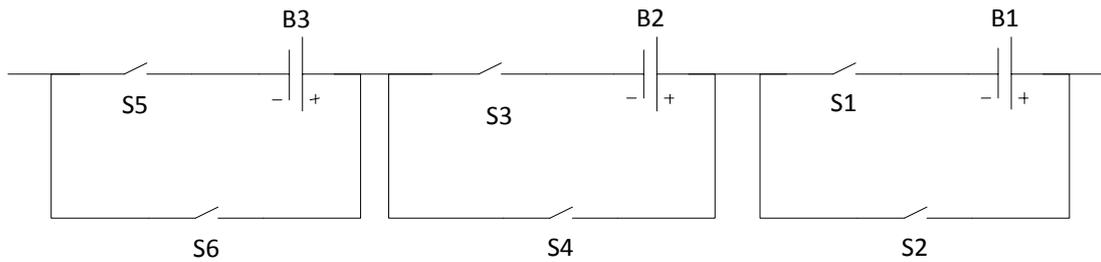
**Histórico** – Manter um histórico do número de ciclos, tensões máximas e mínimas, correntes de carga e descarga máxima e mínimas, e temperaturas registadas seria interessante para posterior avaliação do sistema.

Um sistema BMS em ambiente automóvel é um sistema muito exigente que tem que interagir com outros sistemas e que tem que trabalhar em tempo real mudando rapidamente as condições de carga e descarga sendo para isso também necessário que se consiga aceder aos sinais necessários em tempo real ou muito reduzidos. Para que se possa carregar um conjunto selecionado de células pois já há células completamente carregadas, adquirir tensões de várias células, ou por exemplo remover uma bateria do sistema em caso de avaria será necessário projetar o circuito das baterias com um elevado dispositivos de comutação onde forem necessários.

O pack de baterias de lítio a usar deve ter baterias ligadas em série para cumprirem com o requisito de fornecer uma tensão elevada e em paralelo para que possam fornecer maior corrente.

As leituras em cada célula da tensão, corrente e temperatura poderão ser feitas pelos integrados propostos e uma posterior leitura destes sinais será feita pelo cérebro.

Para permitir que uma bateria esteja ligada ou desligada do sistema, caso esteja estragada, serão necessários 2 interruptores que serão comandados pelo cérebro.



**Circuito para colocação de células fora de serviço**

Para que estas baterias estejam em funcionamento e todas ligadas em série será necessário que S1, S3 e S5 estejam fechados enquanto S2, S4 e S6 abertos. Se fosse necessário remover por exemplo a bateria 2 devido a defeito seria necessário abrir S3 e fechar S4 de modo que B1 ficasse em série com B3 e B2 desconectado.

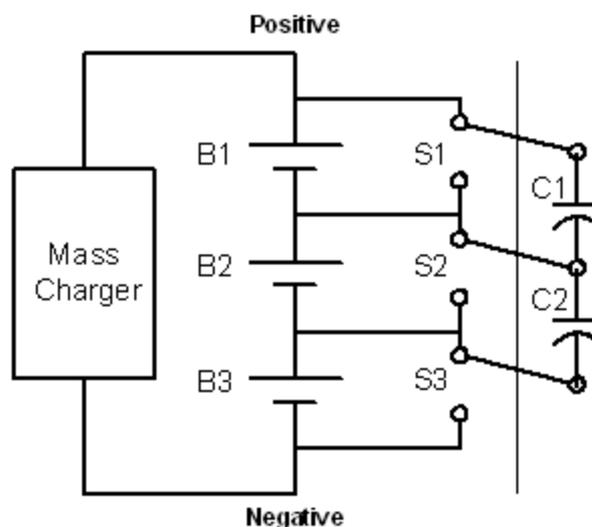
Para o balanceamento/equalização das células existe diferentes métodos podendo estes ser do tipo ativo ou passivo.

### Balanceamento activo

Balanceamento ativo consiste em carregar as células com menor carga a partir da energia de células mais carregadas. Para um balanceamento ativo existe diferentes topologias baseadas no uso de condensadores, indutores/transformadores ou conversores.

#### Métodos de balanceamento baseados em condensadores

**Switched Capacitor** – consiste na utilização de  $n-1$  condensadores que comutam sequencialmente entre  $n$  baterias sendo necessários  $2n$  dispositivos de comutação. Este método irá balancear um pack ligado em série não sendo necessário controlo inteligente. O facto de ter um longo tempo de equalização é uma desvantagem desta topologia. Funciona tanto em carga como descarga.



**Figura 1 – Switched Capacitor**

**Single Switched Capacitor** – consiste num condensador comutado sequencialmente por  $n$  células fornecendo carga das células mais carregadas para as menos carregadas. Este método pode ser acelerado se for programado para uma repetida transferência de energia da célula mais carregada para a menos carregada. Se não for usado controlo inteligente a velocidade de balanceamento será  $1/n$  em relação à topologia em que se usam  $n-1$  condensadores. Com controlo inteligente a velocidade de balanceamento será maior. São necessários  $2n$  dispositivos de comutação tendo cada par a mesma ordem de comando. Funciona tanto em carga como descarga.

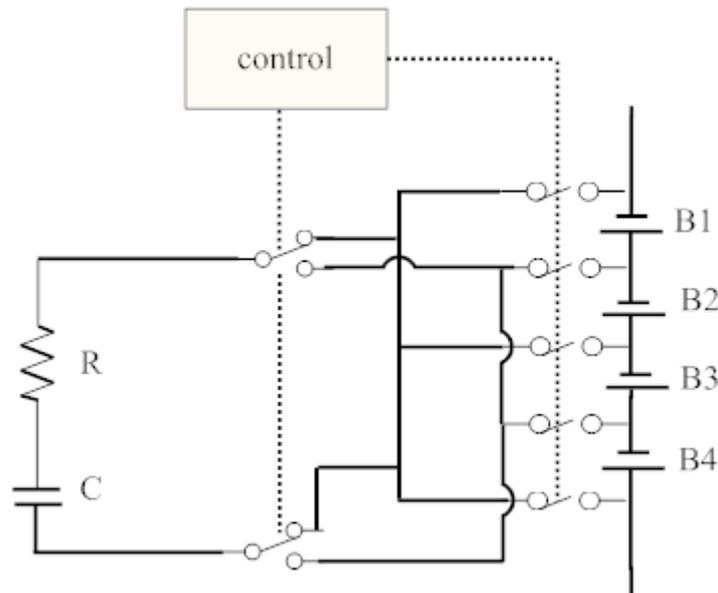


Figura 2 – Single Switched Capacitor

### Métodos de balanceamento baseados em indutores/transformadores

Neste tipo de topologias, indutores ou transformadores são utilizados para mover a energia duma célula ou grupo de células para outra célula ou grupo de células. Os tempos de equalização são melhores, sendo uma desvantagem o custo elevado dos transformadores. Também devido à alta frequência de comutação serão necessários condensadores ligados às baterias para filtrar estas frequências.

**Single/Multi Inductor** – à semelhança do métodos *single switched capacitor* o método *single inductor* utiliza um bobina que transfere energia pelo pack de baterias sendo o controlo efetuado segundo a mesma lógica, escolhendo o par de baterias entre as quais é necessário transferir energia. O método *multi inductor* usa  $n-1$  bobinas. Tem a desvantagem de ser um processo mais demorado, especialmente num pack com muitas células em que se torna lento transferir energia da primeira para a última célula. Funcionam tanto em carga como descarga.

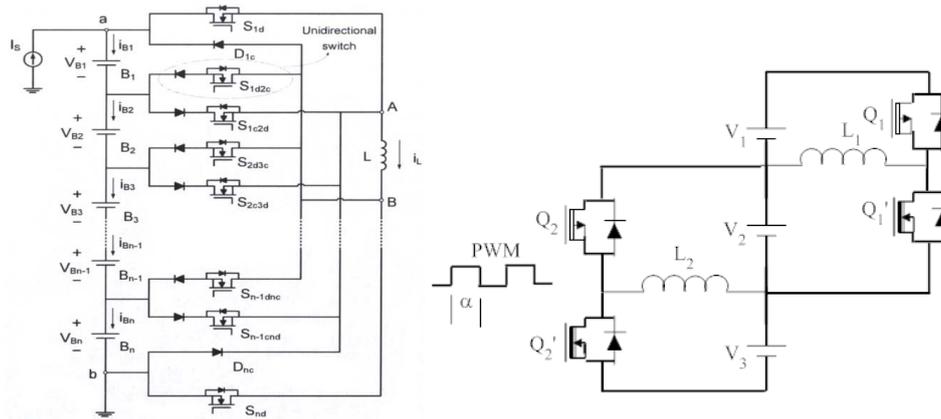


Figura 3 – Single/multi inductor

**Single-Windings Transformer** – pode consistir em duas topologias: pack-to-cell ou cell-to-pack. Na primeira a energia do pack é transferida para as células mais fracas. Na segunda as células mais carregadas transferem energia para o pack. Apenas funciona em carga.

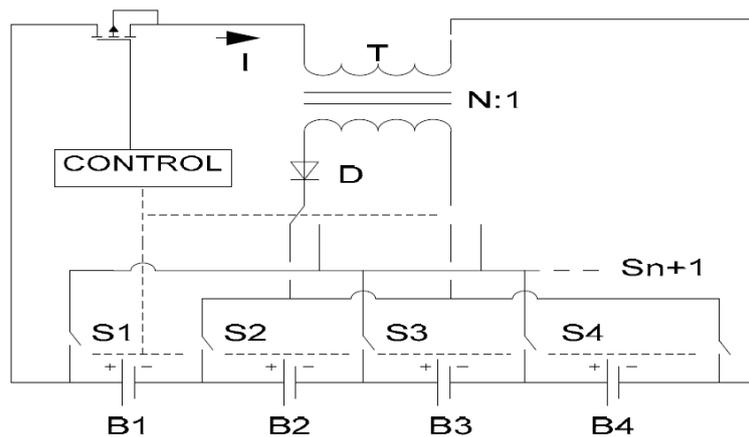


Figura 4 – Single windings Transformer

### Métodos de balanceamento baseados em conversores

São métodos relativamente caros e complexos apresentando a vantagem de serem modulares. Podem ser baseados nas topologias: *Cûk*, *Buck ou Books*, *Flyback*, *Ramp*, *Full-bridge* ou *Quasi-Resonant*. Estes métodos funcionam tanto em carga como descarga.

### Balanceamento passivo

Existe várias técnicas de balanceamento passivo. A técnica dissipativa procura as células mais carregadas e dissipa energia numa resistência de *bypass* até que a sua carga seja igual às células mais fracas. Outra técnica consiste em parar o carregamento de todas as células quando há uma célula que está completamente carregada, e depois descarregá-la até que haja um equilíbrio com as células mais fracas. Uma outra técnica consiste em carregar todas as células até ao máximo, limitando a tensão máxima

aplicada a cada célula e deixando de carregar cada célula quando esta atinge esta tensão. Estes métodos são de baixo nível, e o uso de correntes de *bypass* implica tempos muito longos, energia é desperdiçada e a performance está limitada pelas células mais fracas. Os seus custos são baixos.

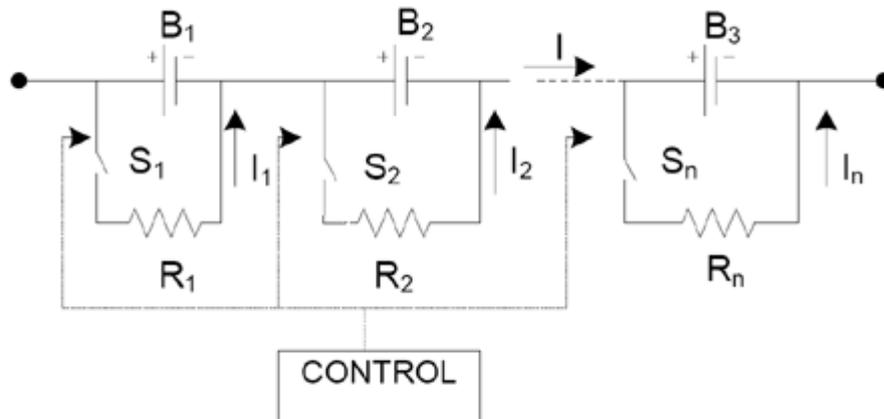


Figura 5 – Shunting resistor

## Carregamento

Para o carregamento das células destacam-se três métodos, **corrente constante/tensão constante**, **charge shunting** e **charge limiting**.

**CC/CV (constant current/ constant voltage)** é o método mais adequado para o carregamento de baterias de lítio sendo o método mais rápido para o carregamento total da carga sendo complicado de implementar. Inicialmente aplica-se pulsos periódicos corrente constante até que a célula atinja a sua tensão máxima, tendo o cuidado de monitorizar o valor de tensão para que não haja sobre carregamento. A partir do momento em que atinge a tensão máxima, vai-se, manter esta tensão monitorizando a corrente até que esta se anule, momento em que se completa o processo de carregamento. Para um bom controlo de corrente e tensão serão necessários interruptores rápidos e de alta corrente.

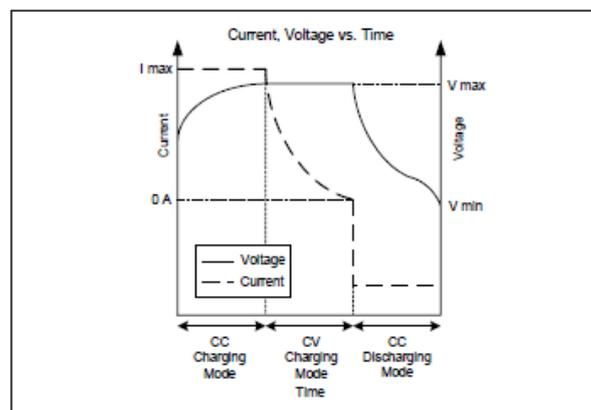


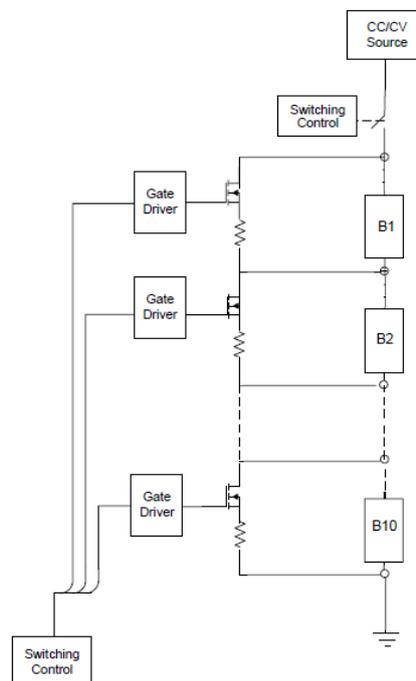
Figura 6 - Evolução Corrente/Tensão durante carregamento CC/CV e descarregamento em CC

**Charge shunting** consiste em elevar a tensão de todas as células até à tensão nominal de uma célula em bom estado e assim que uma célula atingir esta tensão, a corrente passará apenas pelas células que não estão completamente carregadas até que atinjam a tensão nominal. Este método é rápido e permite um armazenamento máximo de energia apesar de precisar de interruptores de alta corrente e de resistências de potência elevada.

**Charge limiting** é um método muito fraco que limita o funcionamento das células a uma janela de valores de tensão. Estas apenas irão carregar até que uma atinja o valor máximo e irão funcionar apenas enquanto pelo menos uma não descarregar até que atinja o valor mínimo.

### Propostas de Solução

O método escolhido para balanceamento será o *Single Inductor* devido ao seu bom e rápido funcionamento assim como menores custos associados. O método *CC/CV* aliado ao *charge shunting* é uma boa opção para o carregamento, aplicando-se o *charge shunting* às células totalmente carregadas, apresentando no entanto alguns custos relevantes e alguma energia dissipada. Na figura seguinte está presente a arquitetura de carregamento de um pack de dez baterias que inclui tanto carregamento *CC/CV* como *charge shunting*.



Arquitectura de carregamento

## Conversores de potência

Uma parte importante de um *Battery management system* é naturalmente a conversão de potência, por um lado para fazer a interface entre as baterias e o barramento DC e por outro para o carregamento da bateria a partir de uma fonte externa.

Assim, será necessário desenvolver um conversor DC/DC para a conversão de potência entre as baterias/Super Condensadores e o barramento DC que possui uma tensão mais elevada do que o *output* das baterias. Para o caso do carregamento das baterias a partir de uma fonte externa, será necessário um conversor AC/DC assumindo que a fonte externa em questão é a convencional rede doméstica monofásica, ~230V, 50Hz. Neste caso o carregamento pode ser muito lento uma vez que a potência desenvolvida pela rede monofásica é baixa. Para um carregamento mais rápido seria necessário mais potência, uma solução seria por exemplo o desenvolvimento de um conversor AC/DC trifásico, permitindo assim uma alimentação a partir de uma linha trifásica.

### Conversor AC/DC, topologias

Existem várias tipologias de conversores AC/DC com diferentes objetivos, dependendo da gama de tensão que se pretende na saída assim como da potência associada, a topologia a adotar varia assim como a sua complexidade.

A primeira consideração a ter para a implementação de um conversor AC/DC é a sua conformidade com a norma IEC 6100-3-2, que limita o conteúdo harmónico e introduzido na rede por parte do equipamento eletrónico e exige um FP unitário.

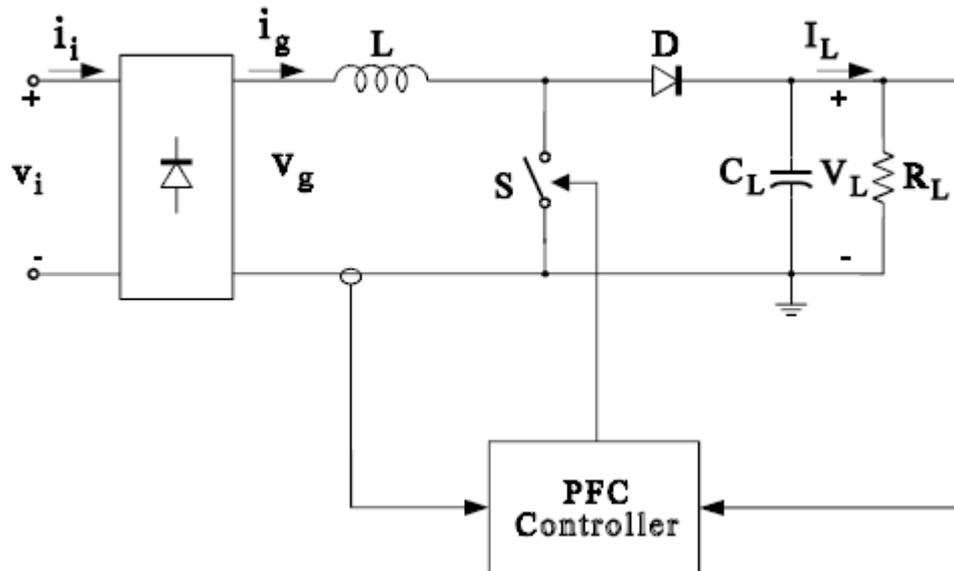
O retificador standard constituído por uma ponte de díodos seguido por um filtro possui performances que não são de todo aceitáveis relativamente ao que respeita à norma IEC 6100-3-2. Assim, será necessário implementar um conversor DC/DC a seguir ao retificador de modo a que o controlo associado dê forma à corrente de acordo com a sua referência. Ou seja, para o valor de corrente e tensão desejado na saída a forma da corrente na entrada deve ser o mais próximo possível de uma senoide em fase com o sinal da corrente, o conversor de correção do fator de potência deve emular uma resistência vista pela rede. [1]

Tendo em conta a norma IEC 6100-3-2, serão apresentadas em seguida várias tipologias de conversores para PFC assim como as características que lhes estão associadas.

#### Conversor Boost

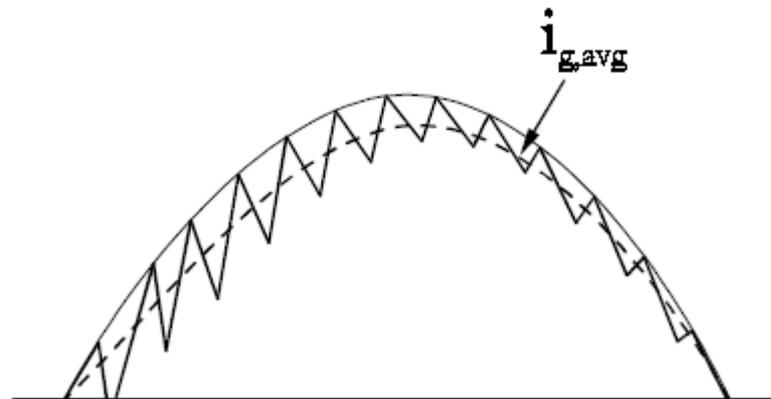
O conversor Boost é um conversor bastante simples e que proporciona correntes de entrada com pouca distorção tendo em conta diferentes tipos de controlo.

Na figura seguinte é possível ver o circuito típico de um conversor AC/DC boost:



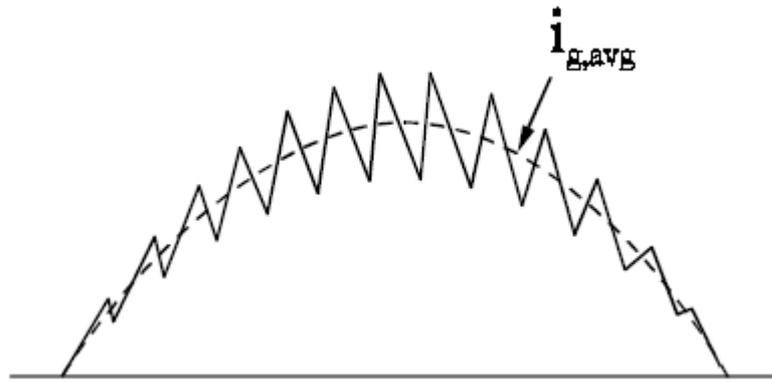
Existem vários tipos de controlo com o objetivo de tornar este conversor boost um PFC os mais utilizados são descritos seguidamente:

No **controlo de corrente de pico** o transístor é ligado a frequência constante por um sinal de relógio e desligado quando a soma entre a rampa positiva da corrente na bobine e uma rampa externa atinge um valor de referencia sinusoidal de corrente. Na figura seguinte é possível ver a forma de onda da corrente associada a este controlo:



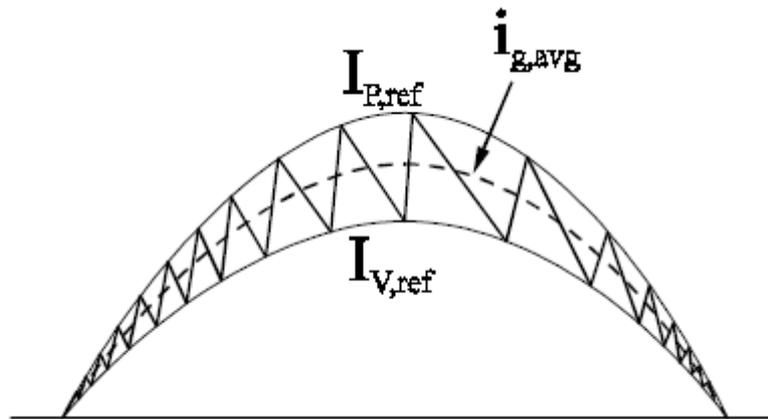
As desvantagens deste tipo de controlo são por um lado a necessidade de uma rampa de compensação para duty cycles superiores a 50% e por outro lado é um controlo muito sensível a ruído de comutação. [1]

No **controlo de média de corrente** a corrente na bobine é medida e filtrada por um amplificador de erro que controla um modulador PWM, assim, o ciclo da corrente de entrada tende a minimizar o erro entre a média da corrente de entrada e a referencia, é possível ver a forma de onda da corrente deste tipo de controlo na figura seguinte: [1]



Este tipo de controlo permite uma melhor forma de onda da corrente de entrada, no entanto possui a desvantagem de se ter de medir a corrente na bobine assim como a necessidade de se utilizar um amplificador de erro que deve ter em conta os pontos de operação durante cada ciclo.

Outro tipo de controlo para o AC/DC boost é **o controlo por histerese** com recorrência a duas referências de correntes sinusoidais. Neste caso, o transístor é ligado quando a corrente na bobina cai para baixo do valor de referência mínimo e é desligado quando esta corrente atinge o valor de referência máximo, assim a forma de onda deste controlo é a seguinte: [1]

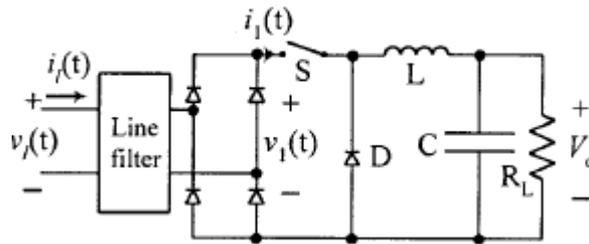


Esta tipologia de controlo proporciona formas de onda da corrente de entrada com pouca distorção, mas a frequência variável na actuação dos transístores, assim como a necessidade de medir a corrente na bobine constituem duas desvantagens.

O conversor boost possui um bom desempenho no que toca à correção do fator de potência quando associado a técnicas de controlo como as descritas acima, no entanto só poderá ser utilizado como carregador de uma bateria de um VEC caso a tensão das baterias seja superior à tensão de pico proporcionada pela rede, caso seja necessária uma tensão abaixo desse valor outras tipologias devem ser utilizadas.

## Conversor Buck

O conversor Buck é uma solução para o caso em que a tensão das baterias seja inferior à tensão de pico da alimentação AC, a tipologia deste conversor é a seguinte:

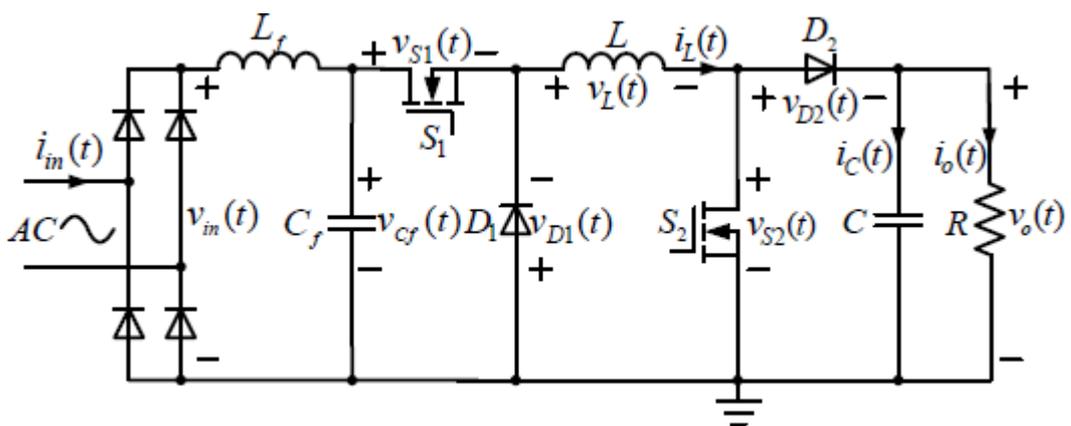


Assim como no caso do conversor boost, é necessário que o controlo seja projetado com o objetivo de integrar um PFC caso contrário esta topologia por si só não tem boas performances nesse sentido.

Um controlo utilizado nesta situação passa por minimizar o erro de tensão através da produção de um sinal de controlo á saída de um controlador PI. A referência de corrente é proporcional à saída do PI multiplicada pelo sinal da tensão com o objetivo de se obter uma referência sinusoidal. Por ultimo a referencia é comparada com o valor de corrente na bobine, e o sinal de erro é compara com um dente de serra de frequência variável com o objetivo de se gerar uma onda PWM para controlo dos transístores. [2]

## Conversor Buck-boost

Este conversor é constituído por um conversor buck e um conversor boost em cascata, o faz dele um conversor bastante versátil um vez que permite uma grande gama de tensões na saída, estas podem ser inferiores ou superiores à tensão de pico da alimentação AC. A topologia do conversor buck-boost é visível na seguinte figura, com a particularidade de este possuir dois transístores para um controlo mais eficaz.

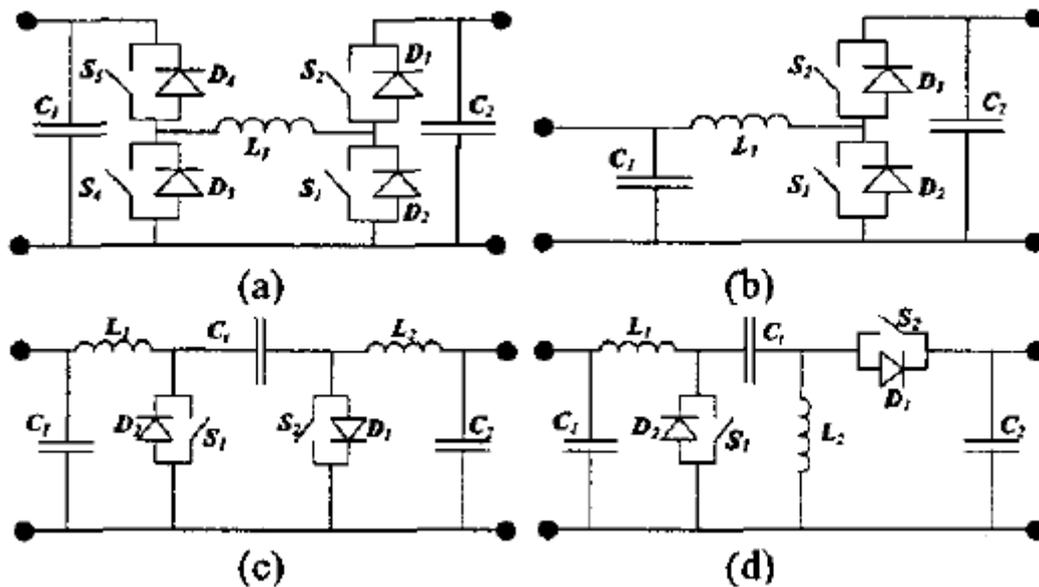


Neste caso são utilizados dois ciclos de controlo independentes, uma para a corrente e outro para a tensão, o ciclo de controlo de tensão é utilizado para regular a tensão de saída do conversor e o ciclo de controlo de corrente é utilizado para controlar a referencia da corrente na bobine, de modo a moldar a forma de onda sinusoidal e em fase com a tensão de modo a obter o fator de potência unitário. [3]

Existem ainda mais conversores que podem ser utilizados com correctores do factor de potência como é o caso do Flyback, do Cuk e do Sepic. Estes conversores são eficazes mas bastante mais complexos, uma vez que permitem a bi-direccionalidade. No entanto, uma vez que os conversores acima descritos respondem à partida à necessidade de alimentação das baterias de um veículo elétrico e a correção do fator de potência pode ser bastante próxima da unitária, qualquer dos conversores acima descritos é uma escolha aceitável nesse sentido, uma vez que a bi-direccionalidade é uma característica não necessária neste caso. A única questão que os diferencia poderá ser apenas a gama de tensão de saída que será necessário obter.

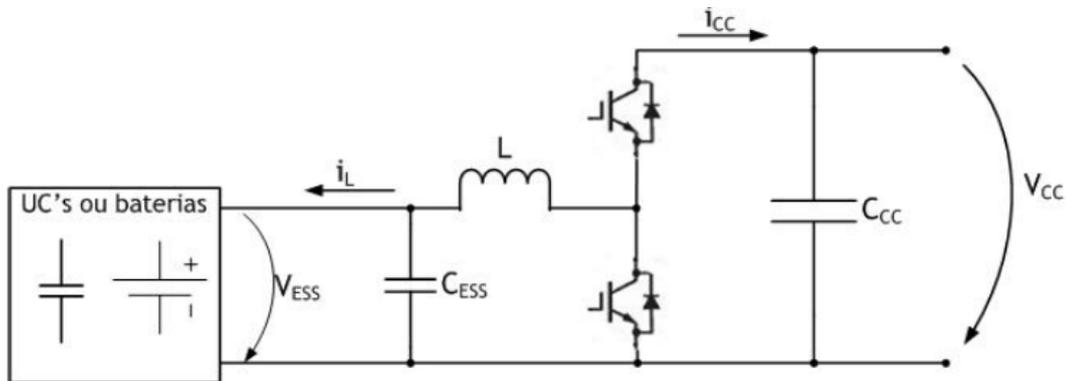
### Conversor DC/DC, topologias

A primeira característica a ter em conta na escolha de uma topologia DC/DC para interface entre a bateria/UC e o barramento DC é naturalmente a propriedade da bi-direccionalidade. Para além disso o conversor deve ser capaz de elevar a tensão num sentido dado que geralmente o barramento DC se encontra a uma tensão mais elevada do que o output das baterias. Já no sentido contrário, o conversor deve ser capaz de abaixar a tensão e drenar a corrente proveniente da frenagem regenerativa do motor para os ultracapacitores ou para as baterias. Assim, de seguida são apresentadas algumas das topologias mais utilizadas em veículos elétricos:



Em (a) temos o conversor buck-boost em cascata, em (b) temos o conversor em meia ponte, em (c) o conversor Cuk e em (d) o conversor SEPIC/Luo. [4] Em, [4] são relacionadas as topologias em termos de  $D$  e correntes em todos os componentes, sendo que as topologias Cuk e Sepic são as que possuem os valores de corrente maiores. Assim, o conversor em meia ponte será o mais adequado aqui dado a sua eficiência e o facto de possuir menos componentes passivos.

Por fim, é apresentada a arquitetura de interligação entre a bateria de ultracompensadores, as baterias e o barramento DC. Tendo em conta que é necessário dois conversores, um para cada uma das partes que são associadas em paralelo, os UCs e as baterias [5]:



## Referências

- [1] L. Rossetto, G. Spiazzi, P. Tenti, CONTROL TECHNIQUES FOR POWER FACTOR CORRECTION CONVERTERS, University of Padova,
- [2][http://ijeit.org/index\\_files/vol2no1/POWER%20QUALITY%20IMPROVEMENT%20IN%20A.pdf](http://ijeit.org/index_files/vol2no1/POWER%20QUALITY%20IMPROVEMENT%20IN%20A.pdf)
- [3] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5944581>
- [4] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1210630>
- [5] Rocha, Tiago. Sistema de Alimentação de um VEC (Veículo Eléctrico de Competição). Dissertação, 2011
- [6][http://en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable_battery)
- [7][http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium\\_ion\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_ion_battery)
- [8][http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium\\_ion\\_polymer\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_ion_polymer_battery)
- [9][http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical\\_Chemistry/Electrochemistry/Voltaic\\_Cells/Case\\_Study%3A\\_Battery\\_Types](http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical_Chemistry/Electrochemistry/Voltaic_Cells/Case_Study%3A_Battery_Types)
- [10][Documentos que se encontram na Dropbox em EAUT.11\Bibliografia](#)
- [11][www.cars21.com/files/papers/Bosch-153.pdf](http://www.cars21.com/files/papers/Bosch-153.pdf)
- [12][http://www.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications\\_pof/pof\\_fall\\_2007/materials\\_for\\_the\\_environment/energy\\_storage.htm](http://www.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications_pof/pof_fall_2007/materials_for_the_environment/energy_storage.htm)
- [13][http://www.hitachi.com/rev/1998/revoct98/r4\\_108.pdf](http://www.hitachi.com/rev/1998/revoct98/r4_108.pdf)

- [14][http://en.wikipedia.org/wiki/Okinawa\\_Yanbaru\\_Seawater\\_Pumped\\_Storage\\_Power\\_Station](http://en.wikipedia.org/wiki/Okinawa_Yanbaru_Seawater_Pumped_Storage_Power_Station)
- [15]<http://wikipedia.org>
- [16]<http://www.mpoweruk.com/bms.htm>
- [17]<http://www.mpoweruk.com/balancing.htm>
- [18]<http://itee.uq.edu.au/~aupec/aupec04/papers/PaperID160.pdf>
- [19] Jian Cao; Schofield, N.; Emadi, A.; , "Battery balancing methods: A comprehensive review," Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE , vol., no., pp.1-6, 3-5 Sept. 2008
- [20] Daowd, M.; Omar, N.; Van Den Bossche, P.; Van Mierlo, J.; , "Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE , vol., no., pp.1-7, 6-9 Sept. 2011