

Sistemas de Engenharia -
Automação e Instrumentação

Grupo 1

2012/2013

Dimensionamento do Sistema de Armazenamento de
Energia

<versão 2.0>

Elaborado por: Afonso Lopes

Rui Marcelino

Índice

1. [Introdução](#)
2. [Necessidades energéticas do veículo](#)
3. [Topologia do Sistema de Armazenamento de Energia](#)
4. [Dimensionamento do Sistema de Armazenamento de Energia](#)
 - 4.1. [Dimensionamento do Banco de Baterias](#)
 - 4.2. [Dimensionamento do Banco de Ultra-Condensadores](#)
 - 4.3. [Resultado Final](#)
5. [Dimensionamento de Conversores DC-DC](#)
 - 5.1. [Dimensionamento do Conversor DC-DC para o banco de Baterias](#)
 - 5.2. [Dimensionamento do Conversor DC-DC para o banco de Ultra-Condensadores](#)
6. [Conclusão](#)

1. Introdução

Este documento tem como objectivo o dimensionamento do sub-sistema Armazenamento de Energia do veículo eléctrico

2. Necessidades energéticas do veículo

O veículo tem de estar capacitado de recursos ao nível energético que permitam o desempenho de velocidade aceleração e autonomia pretendidos.

O dimensionamento do sistema de armazenamento de energia passa por conseguir uma correcta modelação da dinâmica do veículo.

A simulação da dinâmica do veículo foi feita com recurso a uma ferramenta de software *OptimumLap* [1].

De forma sucinta, este simulador permite efectuar o design de um veículo recorrendo a um nº mínimo de especificações do veículo, como por exemplo dados relativos ao tipo de tracção usada, motor(es) utilizados, pneus, suspensão ou dados da aerodinâmica do veículo. Este simulador possibilita testar o veículo num dado circuito concebido pelo utilizador.

Caracterização do veículo

Tipo de Veículo – Open Wheeler Car

Massa do veículo – 270Kg

Tipo de Tração - 2WheelDrive

Coefficiente de arrasto aerodinâmico $C_d=0.34$

Area frontal $A_f=0,72m^2$

Densidade do ar $\rho=1.2Kg/m^3$

Raio da Roda= 0,288m

Coefficiente de resistencia de rolamento $u=0,007$

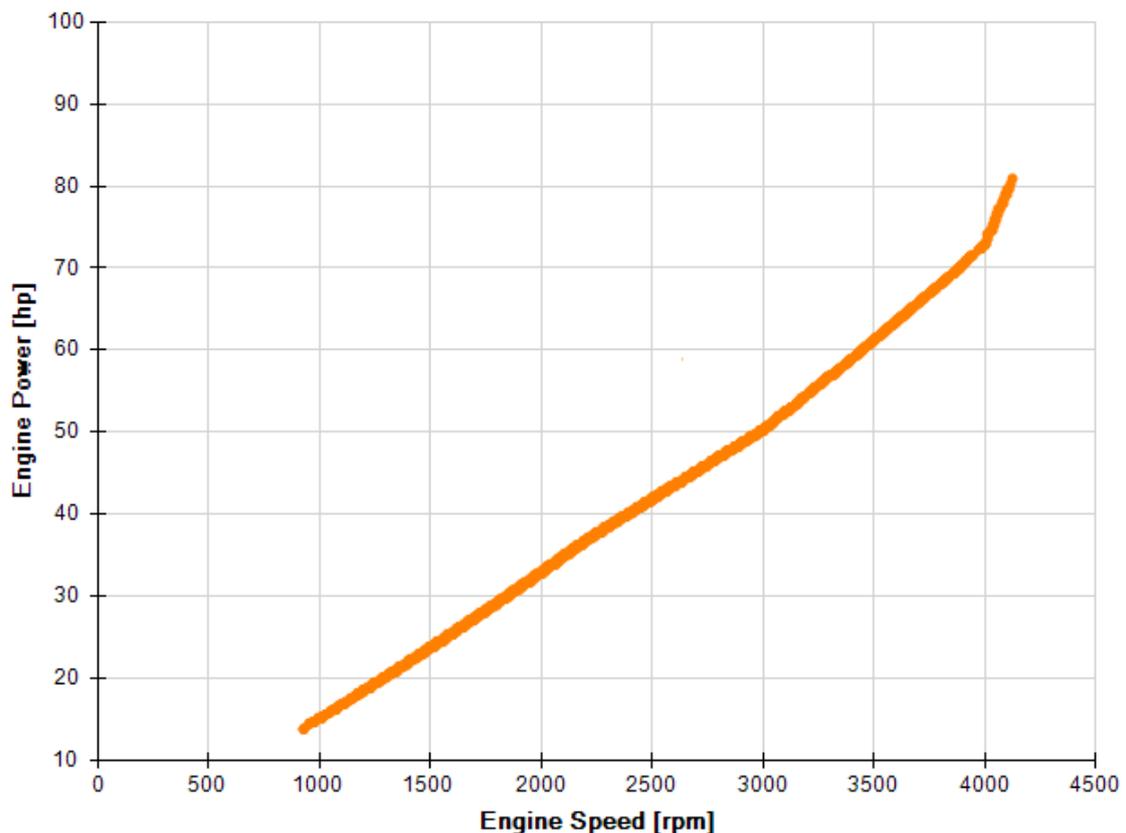
Fricção Lateral = 1,2

Fricção Longitudinal =1,2

Tipo de Transmissão fixa $G=2,86$

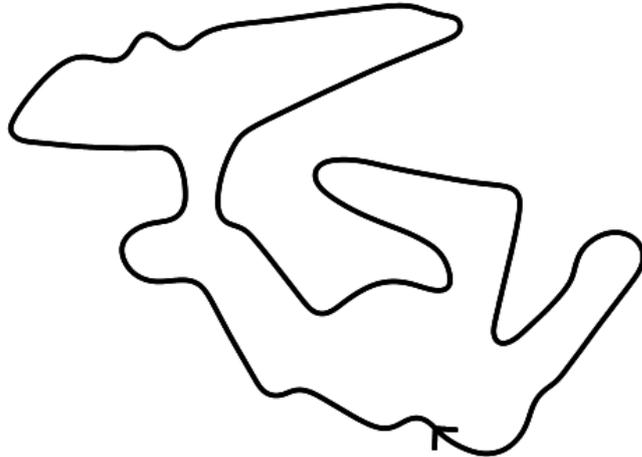
Caracteristica do motor *EMRAX LC Standard_ liquid cooled*

Engine Power [hp] - Engine Speed [rpm]



Caracterização da Prova

A simulação do veículo foi feita num circuito desenhado que representa a prova de Endurance FSAE Germany 2012. O circuito tem 1,4km de distância.



Resultados obtidos da Simulação

ProjectoFormulaStudent		KPI Description	FSAE E...
Vehicle	Vehicle	Vehicle	Vehicle
Track	FSAE Endurance Germany 2012	Lap time [s]	90,50
Results	[90,50] Vehicle, FSAE Endurance Ge	Percent in Corners [%]	86,80
Analysis	Tables	Percent Accelerating [%]	54,04
	Table	Percent Braking [%]	29,87
	Charts	Percent Coasting [%]	0,69
	2D Batch Charts	Percent 100% Throttle [%]	9,78
	3D Batch Charts	Percent TCS Enabled [%]	67,75
	Track Maps	Lowest Speed [km/h]	24,69
	FSAE Endurance Germany 2012 - Spe	Highest Speed [km/h]	109,59
	FSAE Endurance Germany 2012 - Eng	Average Speed [km/h]	58,28
	FSAE Endurance Germany 2012 - Eng	Energy Spent [kJ]	1067,20
	FSAE Endurance Germany 2012 - Eng	Fuel Consumption [kg]	+Infinito
	FSAE Endurance Germany 2012 - Eng	Gear Shifts [-]	0,00
	FSAE Endurance Germany 2012 - Ela	Maximum Lateral Acceleration [m/s ²]	-11,76
	FSAE Endurance Germany 2012 - Bra	Maximum Longitudinal Acceleration [m/s ²]	5,74
	FSAE Endurance Germany 2012 - Eng	Maximum Longitudinal Deceleration [m/s ²]	-12,16
		Time in Sector 1 [s]	90,50
		Maximum Speed in Sector 1 [km/h]	109,59
		Minimum Speed in Sector 1 [km/h]	24,69
		Percent in Gear 1 [%]	100,00

Da figura anterior, conclui-se que o veículo demora 90,5 segundos a completar a prova. As necessidades energéticas do veículo a nível mecânico, isto é, não contabilizando a eficiência global do sistema, são de 1067kJ, o que equivale a 297Wh. A velocidade média do veículo no trajecto foi de 58,3km/h.

Característica de Velocidade linear do veículo



FSAE Endurance Germany 2012 - Speed [km/h]



Speed [km/h]	
■	24,694
■	33,183
■	41,673
■	50,163
■	58,652
■	67,142
■	75,631
■	84,121
■	92,610
■	101,100
■	109,589

Característica de Potência mecânica do Motor



FSAE Endurance Germany 2012 - Engine Power [hp]

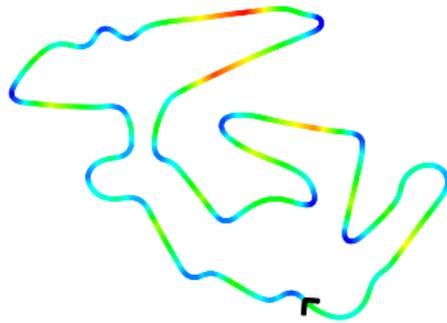


Engine Power [hp]	
■	14,229
■	20,918
■	27,607
■	34,296
■	40,985
■	47,674
■	54,363
■	61,052
■	67,741
■	74,430
■	81,119

Característica de rpm do motor

FSAE Endurance Germany 2012 - Engine Speed [rpm]

FSAE Endurance Germany 2012 - Engine Speed [rpm]

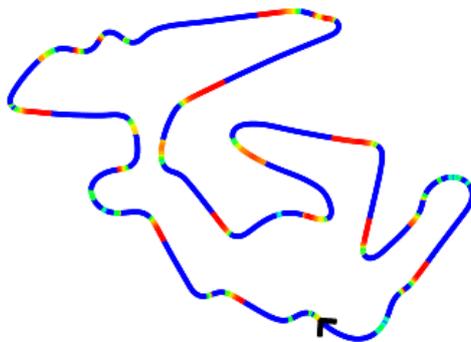


Engine Speed [rpm]	
930,185	
1249,973	
1569,760	
1889,547	
2209,335	
2529,122	
2848,910	
3168,697	
3488,485	
3808,272	
4128,060	

Característica de accionamento do pedal Travagem

FSAE Endurance Germany 2012 - Brake [%]

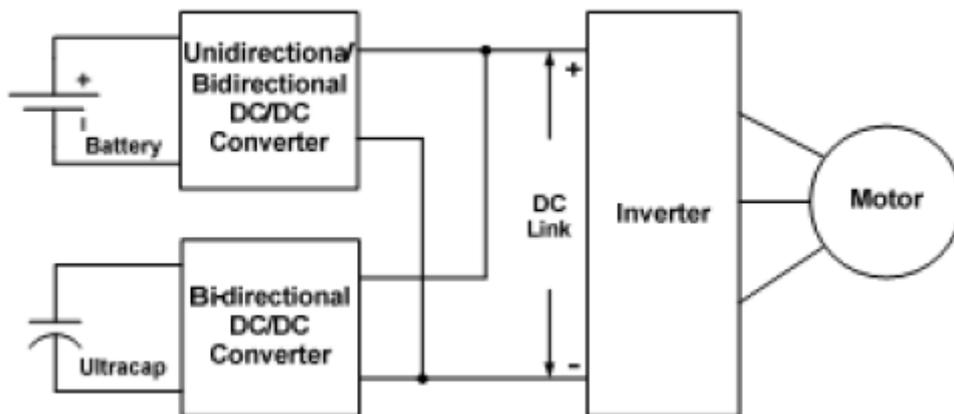
FSAE Endurance Germany 2012 - Brake [%]



Brake [%]	
0,000	
10,000	
20,000	
30,000	
40,000	
50,000	
60,000	
70,000	
80,000	
90,000	
100,000	

3. Topologia do Sistema de Armazenamento de Energia

A topologia de armazenamento de energia definida para o projecto é a seguinte:



É uma configuração que recorre de múltiplos conversores ligados a um barramento DC comum.

Cada fonte de energia tem um conversor DC-DC dedicado, por forma a retirar o máximo rendimento de cada uma.

Deste modo é possível uma melhor utilização das fontes de energia definidas. Recorrendo às baterias para alimentar a potência média solicitada pelo veículo e recorrendo aos ultracondensadores para a alimentação dos regimes transitórios de operação do veículo onde são solicitadas elevadas potências de pico.

4. Dimensionamento do Sistema de Armazenamento de Energia

Com base nos resultados da simulação da dinâmica do veículo protótipo, é possível efectuar o dimensionamento dos acumuladores.

Tendo a prova de Endurance 22km de distância, significa que o trajeto de 1,4 km terá de ser feito em 16 voltas.

Ou seja, as necessidades energéticas do veículo que eram de 296,4Wh pelo trajecto resultam num total de 4742,4Wh para a prova de Endurance.

No entanto este valor representa a energia que é transferida para as rodas.

Torna-se necessário considerar as perdas globais do sistema de conversão, que se subdividem pelo sistema de transmissão, pelo motor+inversor e também pelos conversores DC-DC.

- Rendimento do sistema de transmissão: 95%
- Rendimento do sistema motor+inversor: 90%
- Rendimento de Conversores DC-DC: 90%

A eficiência global do sistema é então de $\eta=77\%$.

4.1 Dimensionamento do Banco de Baterias

A energia que as baterias têm de fornecer considerando o rendimento global do sistema é de:

$$W_{batt} = \frac{4724}{\eta_{global}} = \frac{4724}{0.77} = 6162,73Wh$$

O barramento de entrada do inversor é de 600Vdc

O banco de baterias foi definido para uma tensão de 300Vdc, de forma a resultar um factor multiplicativo de 2 no conversor DC-DC no modo de funcionamento boost.

A capacidade da bateria em Amperes/hora é função da tensão das baterias:

$$C_n = \frac{W_{batt}}{V_{batt}} = \frac{6162,73}{300} = 20,54Ah$$

Considerando uma profundidade de descarga máxima das baterias não superior a 80%:

$$C_{nd} = \frac{C_n}{DOD} = \frac{20,54}{0.8} = 25,68Ah$$

As baterias de Lítio Polímero têm uma tensão nominal de 3,7Vdc

O nº de células a colocar em série é dada por:

$$N_s = \frac{V_{batt}}{V_{célula}} = \frac{300V}{3,7V} = 82$$

O nº de fileiras de 82 células a colocar em paralelo é função da capacidade C (Ah) da bateria escolhida.

$$N_p = \frac{C_{nd}}{C}$$

A tecnologia de baterias escolhida para o projecto foram as baterias de Lítio Polímero

Foi feito um levantamento de baterias deste tipo de tecnologia existentes no mercado e com a sua aplicação mais orientada para veículos eléctricos.

	Tensao (V)	C (Ah)	Wh/Kg	Wh/dm ³	Custo por Wh
SLPB50106100_5Ah_Grade	3,7	5	160,87	345,60	0,25
SLPB75106100_7.5Ah_Grade.	3,7	7,5	179,03	349,06	0,25
SLPB75106205_16Ah_Grade	3,7	16	179,39	363,25	0,27
Gebattery 8050150	3,7	5,00	150,40	333,30	0,20
Gebattery 8050175	3,7	11,00	202,25	502,72	0,17
8000mAh 15C (8059156) Battery	3,7	8	164,44	346,93	0,15
9759156) Battery Cell (DGR-A)	3,7	10,5	185,00	424,37	0,17

Foi escolhida a bateria com maior densidade de energia (Wh/Kg) e maior densidade volumétrica (Wh/unidade de volume).

A nível de custos, não foi possível obter o preço unitário da Célula Gebattery 805175 [5]



O preço é negociável com o fabricante. Para efeitos de comparação foi considerado a 35\$usd. O peso de cada célula é de 201g.

O nº de fileiras a colocar em paralelo:

$$Np = \frac{Cnd}{C} = \frac{25,68}{11} = 2,33 = 3$$

O banco de baterias resulta num arranjo 82SP3.

A capacidade do banco de baterias é de

$$W_{bancobaterias} = Ns * Np * C = 9900Wh$$

A máxima corrente de descarga especificada pelo fabricante é de 5C.

Significa que o banco de baterias dimensionado tem uma corrente máxima de descarga de 165A.

A potência máxima das baterias é de aproximadamente 50kW.

Em termos de peso e custo resultante:

$$PesoTotal = Ns * Np * P_{celula} = 49,4Kg$$

$$Custo = Ns * Np * Custounitario = 8610$usd$$

4.2 Dimensionamento do Banco de Ultra-Condensadores

Os ultracondensadores são um factor determinante no sistema de armazenamento de energia.

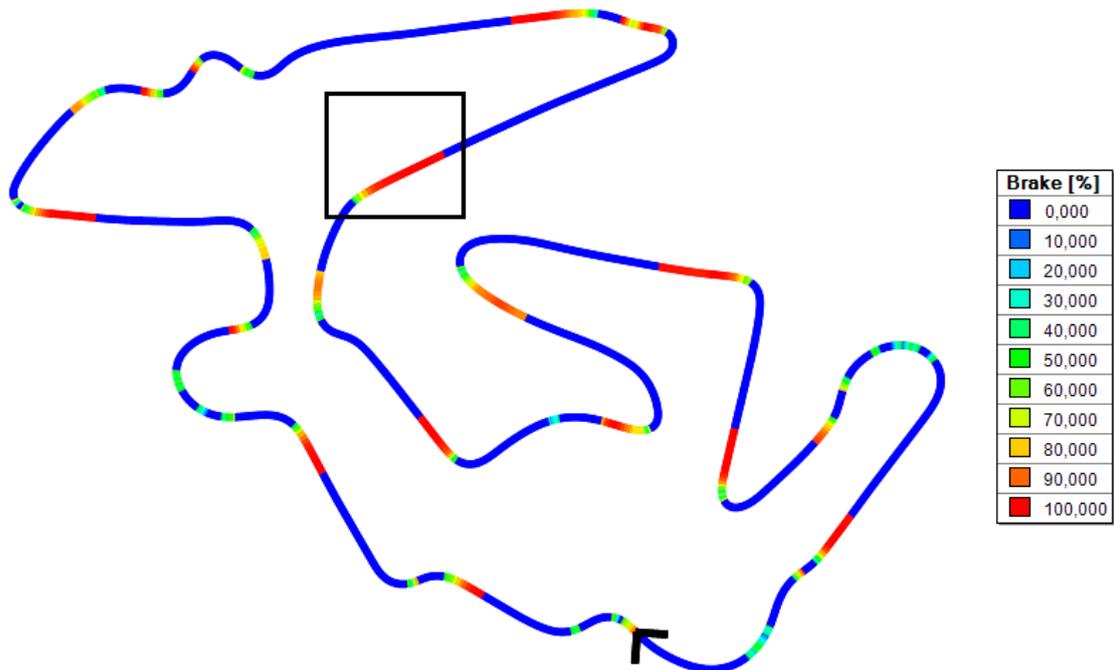
O principio de utilização dos ultra-condensadores é o seguinte.

O piloto ao enfrentar uma curva tem de travar, fornecendo a energia da travagem que vai carregar os ultracondensadores.

No fim da curva pede-se uma forte aceleração ao motor, que por sua vez solicita uma maior potência ao armazenamento de energia, do qual os ultracondensadores, carregados previamente na travagem, fornecem a potência desejada.

A energia que os ultra-condensadores devem armazenar é definida pela energia total regenerada numa travagem.

Recorrendo ao gráfico de accionamento do pedal de travagem, foi encontrado o perfil de maior travagem no percurso:



Foram extraídos os dados da potência do motor desde o início da travagem em questão até ao final desta e também a duração envolvida.

A potência inicial é de 70hp, a potência do motor no final da travagem é de 19hp. A duração da travagem é de aproximadamente 2 segundos.

A energia que os condensadores têm de armazenar é:

$$E = 2s \left(\frac{70 - 19}{3600} \right) * 746 = 21,14Wh = 76092J$$

A capacitância mínima dos ultra-condensadores irá depender da tensão aos terminais. A tensão do banco de ultra-condensadores foi definida em $V=300\text{vdc}$:

$$C_{min} = \left(\frac{8 * E}{3 * V^2} \right) = 2,25F$$

O nº de condensadores em série é função da tensão do barramento de condensadores.

$$N_s = \frac{V}{V_{condensador}} = \frac{300V}{2.7V} = 112$$



O nº de fileiras de condensadores a colocar em paralelo tem que ser suficiente para que resulte num valor superior à capacitância mínima definida de $C_{min}=2,25F$, visto que a colocação de condensadores em série reduz esse valor.

$$C_{banco_{condensadores}} = \frac{C_{condensador}}{N_s} * N_p$$

$$C_{banco_{condensadores}} > 2,25F$$

Foi feito um levantamento de condensadores existentes no mercado:

	Tensao (V)	C (Farads)	Peso	ESR	Custo
BCAP650 P270 K05	2,7	650	0,160	0,8m	27,95
BCAP1200 P270 K05	2,7	1200	0,260	0,58m	33,09
XV3550-2R7307-R	2,7	300	0,062	6m	33,85
XV3560-2R7407-R	2,7	400	0,072	3,2m	40,02

Para $N_p=1$:

$$C_{banco_{condensadores}} = \frac{C}{N_s} = \frac{300}{112} = 2,68F (> 2,25F)$$

Foi escolhido o Ultra Condensador de 300F [6], uma vez que consegue satisfazer o limite mínimo de capacitância, tornando desnecessária a colocação de uma 2ª string de condensadores em paralelo.

Foi considerada uma profundidade de descarga máxima de 50%.

Significa que a tensão aos terminais irá variar entre 150V e 300V, ou seja, uma conversão de tensão com um factor multiplicativo entre 4 e 2 para o barramento do inversor.

A energia máxima disponível é dada por:

$$W_{sc} = 0.5 * C * (V_{max} - V_{min})^2 = 91872J = 25,52Wh > (E = 21,14Wh)$$

Esta energia pode ser aproveitada para fornecer energia ao motor, em particular, nos momentos de aceleração, onde é solicitada a potência de pico.

Potencia solicitada (kW)	10	20	30	40	50	60	70
Duracao (s)	9,19	4,59	3,06	2,30	1,84	1,53	1,31

Em termos do peso resultante do banco de condensadores e custo

$$Peso = N_s * N_p * P_{condensador} = 6,944Kg$$

$$Custo = N_s * N_p * Custounitario = 3791\$$$

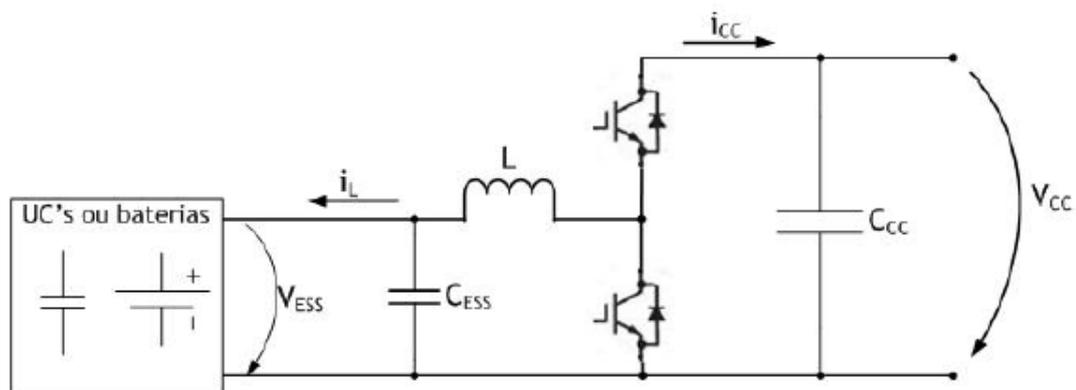
4.3 Resultado Final

O dimensionamento do sistema de armazenamento de energia resulta num peso de 56Kg e com um custo final de 12000\$usd

5. Dimensionamento de Conversores DC-DC

Os conversores DC-DC definidos para o projecto são da tipologia buck-boost em meia-ponte.

É uma configuração que permite o funcionamento bidireccional de corrente, fornecendo energia à carga no funcionamento Boost, e armazenando energia no funcionamento Buck.



Na figura, C_{cc} representa o condensador de entrada do barramento DC do inversor.

O barramento DC é projectado para funcionar à tensão de 600Vdc.

A frequência de comutação dos conversores foi definida para 20kHz.

5.1 Dimensionamento do conversor DC-DC para o banco de baterias

As baterias são responsáveis por fornecer a potência média do motor.

A tensão máxima de cada célula de bateria é de 4,2V e a tensão mínima de funcionamento é de 2,7V.

Significa que a tensão varia no intervalo [344,4, 221,4]V.

A potência máxima que as baterias podem fornecer é de 56kW.

Funcionamento Buck

Neste modo de funcionamento, as baterias recebem energia do barramento DC.

A corrente máxima com que se podem carregar as baterias é de 1C, ou seja, o banco de baterias admite ser carregado até a um máximo de 33A.

A razão cíclica do conversor neste modo de funcionamento é dada por:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

O dimensionamento é feito considerando a tensão máxima das baterias, ou seja, resulta uma razão cíclica máxima de 0,574.

A corrente consumida pelo barramento DC é função da razão cíclica:

$$I_{entrada} = D * I_{out}$$

Ou seja, a máxima corrente que pode ser extraída na travagem regenerativa para as baterias é de 18,94A.

A taxa de variação da corrente na bobina L foi definido em 2%.

A taxa de variação da tensão no condensador de saída nas baterias foi de 0,1%.

$$\Delta I_L = 0.02 * I_{out} = 0,66A$$

$$\Delta V_C = 0.001 * V_{out} = 0,344V$$

$$L = \frac{V_{out} * (V_{in} - V_{out})}{\Delta I_L * f * V_{in}} = 10mH$$

$$C_{ess} = \frac{\Delta I_L}{\Delta V_C * 8f} = 12\mu F$$

Funcionamento Boost

Neste modo de funcionamento, as baterias fornecem energia ao barramento DC de 600V.

A corrente máxima com que se podem descarregar as baterias é de 5C, ou seja, o banco de baterias admite ser descarregado a um máximo de 165A. Considerando a tensão máxima das baterias de 344V, a potência máxima que se pode extrair das baterias é de 57kW.

A razão cíclica do conversor neste modo de funcionamento é dada por:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

A corrente consumida pelo banco de baterias é função da razão cíclica e da corrente de carga.

$$I_{batt} = \frac{I_{out}}{1 - D}, I_{batt} < 165A$$

A máxima corrente de carga I_{out} é de 94,5A e observa-se à tensão máxima das baterias.

A taxa de variação da corrente na bobina L foi definido em 2%.

A taxa de variação da tensão no condensador de saída do barramento do inversor foi definida em 0,1%

$$\Delta I_L = 0.02 * I_{out} = 1,65A$$

$$\Delta V_C = 0.001 * V_{out} = 0,6V$$

$$L = \frac{V_{in} * D}{\Delta I_L * f} = 4,6mH$$

$$C_{cc} = \frac{I_{out} * D}{\Delta V_C * f} = 3,44mF$$

Componentes passivos:

L_batt=10mH, C_batt=12uF.

5.2 Dimensionamento do conversor DC-DC para o banco de ultra-condensadores

Funcionamento Buck

Neste modo de funcionamento, os ultra-condensadores recebem energia do barramento DC.

Na potência de pico do motor de 85kW, a potência do barramento DC é de 90kW, ou seja, 150A de corrente.

Significa que este conversor tem de estar preparado para receber este valor de potência.

A razão cíclica do conversor neste modo de funcionamento é dada por:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Assumindo a carga mínima definida para os ultra-condensadores, a tensão mínima de funcionamento é de 150V, resulta uma razão cíclica de 0,25.

A corrente consumida pelo barramento DC é função da razão cíclica:

$$I_{entrada} = D * I_{out}$$

Ou seja, para consumir a corrente de pico do motor, a corrente máxima de carregamento dos condensadores I_{out} será de 600A.

A taxa de variação da corrente na bobina L foi definido em 0,1%.

O condensador de saída neste modo de funcionamento é o próprio banco de ultra-condensadores de 2,68F.

$$\Delta I_L = 0.001 * I_{out} = 0,6A$$
$$L = \frac{V_{out} * (V_{in} - V_{out})}{\Delta I_L * f * V_{in}} = 9,38mH$$

Funcionamento Boost

Neste modo de funcionamento, os ultra-condensadores fornecem energia ao barramento DC de 600V, assegurando um boost em momentos de aceleração num curto intervalo de tempo.



A razão cíclica do conversor neste modo de funcionamento é dada por:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

A corrente consumida pelo banco de ultra-condensadores é função da razão cíclica e da corrente de carga.

$$I_{entrada} = \frac{I_{out}}{1 - D}$$

Assumindo a potência de pico do motor de 90kW à entrada, define-se que as baterias são responsáveis por fornecer 50kW e os ultra-condensadores actuam na diferença ou seja 40kW.

A taxa de variação da corrente na bobina L foi definido em 1%.

A taxa de variação da tensão no condensador de saída do barramento do inversor foi definida em 0,1%

$$\Delta I_L = 0.02 * (40000W/600V) = 0,67A$$

$$\Delta V_c = 0.001 * V_{out} = 0,6V$$

$$L = \frac{V_{in} * D}{\Delta I_L * f} = 10mH$$

$$C_{cc} = \frac{I_{out} * D}{\Delta V_c * f} = 2,78mF$$

Componentes passivos:

L_uc=10mH;

O condensador do barramento DC corresponde à soma do valor obtido dos dimensionamento dos dois conversores, ou seja $C_{cc} = 2,78 + 3,44 = 6mF$

6. Conclusão

O dimensionamento do sistema de armazenamento de energia é dos factores mais importantes no projecto de um veículo eléctrico de competição.

O dimensionamento, para além de ter de cumprir os requisitos propostos ao nível do desempenho pretendido como velocidade, aceleração e autonomia, também tem de ter em consideração o impacto a nível do custo e peso resultante.

Anexos

[1] <http://www.optimumg.com/software/optimumlap/>

[2] Muhammad H. Rashid, Power Electronics Circuits Devices and Applications
Third Edition International Edition

[3]

<http://energy.sourceguides.com/businesses/byGeo/US/byP/batP/batt/btora/bTy/pe/lipoly/byB/mfg/mfg.shtml>

[4]

http://www.cleancarb.com/index.php?option=com_content&view=category&id=38&layout=blog&Itemid=57

[5]

[http://www.gebattery.com.cn/geb/EN/ProductList.asp?SortID=143&SortPath=0,134,143,](http://www.gebattery.com.cn/geb/EN/ProductList.asp?SortID=143&SortPath=0,134,143)

[6] http://pt.farnell.com/cooper-bussmann/xv3550-2r7307-r/capacitor-super-300f-2-7v-edlc/dp/2148519?in_merch=New%20Products