

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Guilherme Vianna Santos**

**VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS: GESTÃO DA  
ENERGIA DE FONTES EMBARCADAS UTILIZANDO  
O CONTROLE FLATNESS**

**VIÇOSA  
2013**

**Guilherme Vianna Santos**

**VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS: GESTÃO DA  
ENERGIA DE FONTES EMBARCADAS UTILIZANDO  
O CONTROLE FLATNESS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 - Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. TARCÍSIO DE ASSUNÇÃO PIZZIOLLO

VIÇOSA  
2013



**GUILHERME VIANNA SANTOS**

**VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS, GESTÃO DE ENERGIA DE  
UMA FONTE HÍBRIDA BASEADO NO CONTROLE FLATNESS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 - Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 04 de Abril de 2013.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Tarcísio De Assunção Pizziolo - Orientador  
Universidade Federal de Viçosa

---

Prof. M.Sc. Mauro de Oliveira Prates - Membro  
Universidade Federal de Viçosa

---

Prof. M.Sc. Heverton Augusto Pereira - Membro  
Universidade Federal de Viçosa

*Dedico este trabalho a meus pais e a Universidade Federal de Viçosa*

# *Agradecimentos*

A gradeço aos meus amigos do grupo de pesquisa GESEP (Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência) pelo companheirismo, motivação e ajuda nos trabalhos realizados. Gostaria de também agradecer aos colegas e amigos de curso e a todos os meus professores e a meus pais por todo apoio oferecido. A CAPES e o CNPq pelo apoio financeiro concedido, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível.

*”Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos ”*

***Isaac Newton***

# *Resumo*

As projeções da Agência Internacional de Energia (AIE) indicam que o setor de transportes será o maior consumidor de energia, ultrapassando inclusive o setor industrial. Portanto com esse cenário de aumento acelerado da população, elevado consumo de energia no mundo, aumento nos preços do petróleo, gás natural e do esgotamento dos combustíveis fósseis somados com as questões ambientais, são razões que justificam a utilização de veículos elétricos (VE) no lugar dos atuais veículos. Os VE's propõem uma boa e atraente solução para o transporte de pessoas em ambientes urbanos por serem ambientalmente mais amigáveis. Dentre os VE's existe uma subcategoria denominada Veículos Elétrico Híbrido (VEH) que podem utilizar duas ou mais fontes conectadas no mesmo sistema. Esses veículos podem associar motores a combustão, baterias, super capacitores e célula a combustível de forma paralela ou série para fornecer energia aos propulsores do veículo.

Este trabalho apresenta as características gerais dos veículos elétricos e o funcionamento básico dos veículos elétricos híbridos dotados de fontes de energia elétrica alternativas e ambientalmente mais amigáveis, como célula a combustível, baterias e supercapacitores assim como os princípios básicos do funcionamento desses novos componentes de geração e armazenamento de energia (Célula a Combustível e Super Capacitor). Uma fonte híbrida pode combinar as vantagens das tecnologias de geração e armazenamento de energia, permitindo assim desmembrar o dimensionamento em potência média e potência de transitório, fornecendo uma ganho expressivo em volume e massa do sistema final.

A estratégia de controle é baseada na técnica de controle Flatness. O controle Flatness é útil em situações onde é necessário a geração explícita de trajetória das variáveis de controle, utilizado em várias aplicações por ser uma técnica de controle robusta e que permite o planejamento de trajetórias. A estrutura híbrida da fonte foi baseada em conversores Boost e Boost Isolado. Os resultados finais demonstram o bom controle do barramento CC durante o regime permanente e transitórios.

# *Abstract*

The International Energy Agency (IEA) projections indicate that the transportation sector is the largest consumer of energy, surpassing even the industrial sector. So with this scenario of rapid population increasing, high energy consumption in the world, rising oil prices, natural gas and depletion of fossil fuels coupled with environmental issues, are reasons that justify the use of electric vehicles (EV) in place of current vehicles. The VE's offer a good and attractive solution for transporting people in urban environments because they are more environmentally friendly. Among the VE there's a subcategory called Hybrid Electric Vehicles (HEVs) that can use two or more sources connected to the same system. These vehicles can associate combustion engines, batteries, super capacitors and fuel cells in parallel or series to power the vehicle's thrusters.

This paper presents the general characteristics of the electric vehicles and the basic functioning of hybrid electric vehicles equipped with alternative sources of energy and more environmentally friendly, such as fuel cells, batteries and supercapacitors as well as the basic principles of operation of these new components generation and energy storage (Fuel Cell and Super Capacitor). A source hybrid can combine the advantages of technology generation and energy storage, thus dismembering the scaling average power and power transition, providing a significant gain in volume and mass of the final system.

The control strategy is based on Flatness control technique. Flatness Control is useful in situations where it is necessary to generate explicit trajectory of the control variables. Used in many applications because it is a control technique that enables robust and path planning. The hybrid structure of the source was based Isolated Boost Converters Boost and. The final results demonstrate good control of the DC bus during the steady state and transient.

# *Sumário*

## **Lista de Figuras**

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO . . . . .	12
1.2	JUSTIFICATIVAS . . . . .	14
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
2.1	OBJETIVOS GERAIS . . . . .	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	16
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
3.1	VEÍCULOS ELÉTRICOS . . . . .	17
3.2	VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS . . . . .	18
3.2.1	Veículos Elétricos Híbridos com Célula a Combustível . . . . .	19
3.3	FONTE E SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA VEÍCULO ELÉTRICO . . . . .	23
3.3.1	Célula a Combustível . . . . .	23
3.3.1.1	Princípio de Funcionamento das Células a Combustíveis . . . . .	24
3.3.1.2	Modelagem Simples e Característica de uma Célula a Combustível . . . . .	26
3.3.2	Super Capacitores . . . . .	27
3.3.2.1	Princípio de Funcionamento . . . . .	28
3.3.2.2	Modelo de Dois Ramos . . . . .	29

3.4	FONTE HÍBRIDA DE ENERGIA . . . . .	31
3.4.1	Funcionamento de uma Fonte Híbrida de Energia . . . . .	32
3.4.2	Motores Elétricos . . . . .	34
3.4.3	Controle Flatness . . . . .	34
3.4.3.1	Definição do Controle Flatness . . . . .	35
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>36</b>
4.1	SISTEMA DE FONTE HÍBRIDA PROPOSTO . . . . .	36
4.1.1	Conversor Boost não Isolado . . . . .	36
4.1.2	Conversor Boost Isolado . . . . .	37
4.1.3	Princípio do Controle para Fonte Híbrida . . . . .	38
4.1.3.1	Malha Externa: Controle de energia . . . . .	38
4.1.3.2	Malha Interna: Controle da corrente de entrada . . . . .	43
4.2	CO-SIMULAÇÃO SABER-SIMULINK . . . . .	44
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>46</b>
5.0.1	Controle de um Boost Independente . . . . .	46
5.0.2	Controle dos dois Boost em Cascata . . . . .	49
5.0.3	Controle do Boost Isolado . . . . .	52
5.0.4	Controle da Estrutura Híbrida Completa com Fontes Ideais . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>58</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	58
	<b>Referências</b>	<b>59</b>

# *Lista de Figuras*

1	Configuração paralela de um VEH [1] . . . . .	19
2	Configuração série de um VEH [1] . . . . .	20
3	Gráfico de armazenamento e conversão de energia entre alguns dispositivos [2] . . . . .	21
4	Estrutura do veículo híbrido <i>FCX</i> da Honda [3] . . . . .	22
5	Resposta do veículo <i>FCX</i> da Honda em ciclo de funcionamento [3] . . . . .	22
6	Funcionamento de uma célula a combustível . . . . .	25
7	Curva de tensão por densidade de corrente [4] . . . . .	26
8	(a) Modelo simples de uma célula a combustível . . . . .	27
9	(b) Impedância do modelo . . . . .	27
10	Capacitor eletrolítico (a) e Supercapacitor (b) . . . . .	28
11	Princípio de funcionamento de um supercapacitor. . . . .	29
12	Estrutura interna dos supercapacitores de carbono ativo . . . . .	29
13	Modelo de dois ramos de um supercapacitor. . . . .	30
14	Princípio de identificação dos parâmetros. . . . .	30
15	Diferentes fontes de energia utilizadas nos sistemas híbridos . . . . .	31
16	Resposta dinâmica da célula a combustível [2] . . . . .	32
17	Topologia da fonte híbrida . . . . .	36
18	Conversor Boost em cascata . . . . .	37
19	Conversor Boost isolado . . . . .	37
20	Comando do conversor Boost isolado . . . . .	38
21	Transferência de potência na estrutura da fonte híbrida. . . . .	39

22	Determinação da potência de referência . . . . .	42
23	Co-simulação Simulink-Saber . . . . .	44
24	Bloco SaberCosim . . . . .	45
25	Configurando o Bloco SaberCosim . . . . .	45
26	Circuito Boost simulado no Saber . . . . .	46
27	Sistema de controle Flatness para um Boost . . . . .	47
28	Controlador Sliding Mode . . . . .	47
29	Controlador de energia . . . . .	47
30	Dinâmica inversa . . . . .	48
31	(a) Saída da tensão $V_m$ do boost trajetória a 50rad/s $\xi = 1$ . . . . .	49
32	(b) Corrente de entrada do Boost . . . . .	49
33	(a) Saída da tensão $V_m$ do boost trajetória a 25rad/s $\xi = 1$ . . . . .	49
34	(b) Corrente de entrada do Boost . . . . .	49
35	(a) Saída da tensão $V_m$ do boost trajetória a 10rad/s $\xi = 1$ . . . . .	49
36	(b) Corrente de entrada do Boost . . . . .	49
37	Sistema Boost em cascata . . . . .	50
38	Sistema de controle do Boost em cascata . . . . .	50
39	(a) Resposta de tensão do Boost em cascata . . . . .	51
40	(b) Resposta da corrente do Boost em cascata . . . . .	51
41	Sistema Boost isolado . . . . .	52
42	(a) Saída da tensão $V_s$ do boost trajetória a 60rad/s $\xi = 1$ . . . . .	53
43	(b) Corrente de entrada do Boost Isolado . . . . .	53
44	Sistema Híbrido simulado no Saber . . . . .	54
45	Sistema de controle da fonte híbrida . . . . .	55
46	Determina a potência de referência da fonte principal . . . . .	56
47	(a) Saída da tensão $V_s$ da estrutura com trajetória a 50rad/s $\xi = 1$ . . . . .	56

48	(b) Corrente de entrada da estrutura . . . . .	56
49	(a) Potências das fontes e de carga . . . . .	57
50	(b) Tensão dos barramentos CC . . . . .	57

# ***1 INTRODUÇÃO***

## **1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO**

Os combustíveis fósseis são as maiores fontes de energia consumida atualmente no mundo, suprimindo 85% da energia primária, sendo o restante suprido por energias hídrica, nuclear, de biomassa, eólica, fotovoltaica, solar térmica, geotérmica e de outras fontes [5].

Analisando as previsões mundiais do consumo de energia observa-se que a era dos combustíveis fósseis está longe de acabar, mas a sua predominância tende a declinar. Esta é a conclusão do último relatório da Agência Internacional de Energia (AIE).

A demanda de energia aumenta devido ao crescimento da população mundial, a industrialização, desenvolvimento econômico nos países subdesenvolvidos e tendência mundial a maiores consumos e mobilidade. Atualmente a maior parte da população mundial está nos países subdesenvolvidos com pouco consumo de energia sendo que os países industrializados com aproximadamente 17% da população mundial consomem 55% da energia produzida no mundo. Entretanto segundo o relatório anual da AIE, a procura mundial de energia crescerá mais de um terço, sendo estimado em 35% a 46% até 2035, esse crescimento é impulsionado pelos países emergentes, no qual a China, a Índia e o Oriente Médio representam 60% desse aumento [5].

Um investimento adicional em tecnologias mais eficientes do ponto de vista energético compensaria redução das despesas dos combustíveis atuais. Portanto o mundo se mobiliza a procurar soluções energéticas alternativas (como o biocombustível a eletricidade e o hidrogênio) devido ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis e da poluição ambiental. Como exemplo a União Européia prevê aumentar para 10% a porcentagem de energias renováveis utilizadas nos transportes rodoviários até 2020.

O setor de transporte em grandes centros urbanos é o principal responsável pelas emissões de poluente. Um levantamento feito pelo Departamento de Medicina Preventiva da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo revelou que, nos dias mais poluídos,

o número de internações por doenças respiratórias cresce cerca de 8% e a mortalidade geral aumenta entre 4% e 6%. O mesmo estudo mostra que os mais afetados são os idosos e as crianças. Esses dados científicos têm sido importantes para comprovar que a poluição do ar não é apenas uma questão ambiental, mas também um problema de saúde pública. Segundo especialistas, a redução das emissões traria benefícios imediatos à saúde da população: só nos Estados Unidos isso poderia evitar 18.700 mortes e 3 milhões de faltas ao trabalho por ano. Se nada for feito, segundo estimativa da Organização Mundial de Saúde, até o ano 2020 a poluição deverá matar 8 milhões de pessoas em todo o mundo [6]. Já o jornal "Valor Econômico" destaca os efeitos da poluição em São Paulo conforme abaixo.

“A cidade de São Paulo gasta, por ano, 208 milhões de dólares com os efeitos da poluição atmosférica. A estimativa considera apenas os custos diretos que a cidade tem com as doenças e mortes causadas pelo coquetel de gases que os paulistanos inalam toda vez que enchem os pulmões. Em dias em que há paralisação do metrô e conseqüente aumento na concentração de poluente, ocorrem nove mortes a mais do que nos dias pós-greve. Quem vive em cidades poluídas como esta tem a vida abreviada em 2,5 anos” (jornal Valor Econômico 14/10/2008)

As projeções da AIE indicam, para o cenário de referência, que em 2030 o setor de transportes será o maior consumidor de energia, ultrapassando inclusive o setor industrial. Portanto com esse cenário de aumento acelerado da população, elevado consumo de energia no mundo, aumento nos preços do petróleo e do esgotamento dos combustíveis fósseis somados com as questões ambientais, são razões que justificam a utilização de veículos elétricos (VE) no lugar dos atuais veículos. O interesse em desenvolver os VE's com fonte de energia limpa e renovável para substituir os atuais veículos à combustão vem aumentando constantemente nos últimos anos, pois o mesmo propõem uma boa e atraente solução para o transporte de pessoas em ambientes urbanos por serem ambientalmente mais amigáveis.

Os veículos elétricos no início do século XX coexistiam juntamente com os veículos a combustão interna e a vapor, entretanto os veículos elétricos praticamente desapareceram na década 1920 em detrimento aos veículos dotados de motores a combustão interna sendo dominantes até os dias atuais devido aos grandes incentivos e aperfeiçoamento

dessa tecnologia. Porém, o domínio dos carros a combustão e sua grande utilização de forma acentuada nos grandes centros urbanos têm provocado grandes implicações nos níveis de poluição e aumento do consumo de combustíveis. Esses fatores favorecem os estudos e soluções de tecnologias mais limpas, aplicadas ao transporte [7].

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

Diante do contexto ambiental e dos altos preços dos combustíveis fósseis, os carros elétricos ganham espaço e força para o seu desenvolvimento e comercialização. Atualmente, diversos países têm criado incentivos, por meio de leis, fomentando o desenvolvimento, a produção e consumo de veículos movidos a energia limpa. Esses fatos aliados às tecnologias já existentes têm popularizado os veículos movidos à energia renovável, propiciando a substituição gradativa da frota e proporcionando menores impactos ambientais e melhoria da saúde da população, especialmente nos grandes centros urbanos [8] justificando a necessidade de incentivos e desenvolvimento de tecnologias que viabilizem os veículos elétricos.

No Brasil, alguns passos já estão sendo tomados para a popularização dos automóveis elétricos de produção nacional. Financiamentos foram anunciados pelo BNDES para o desenvolvimento de motores elétricos inovadores a serem fabricados pela WEG S/A, pretendendo abranger as modalidades de tração elétrica híbrida e de tração puramente elétrica. O alto potencial de crescimento do mercado de veículos elétricos de demanda nacional em nichos específicos, justificam o financiamento [9].

Uma recente proposta de leis do Estado de São Paulo pretende incentivar a disseminação de veículos elétricos e movidos a hidrogênio no Município, beneficiando diretamente os cidadãos com a diminuição da poluição e a conseqüente melhoria do meio ambiente, ocasionando significativa redução dos danos provocados à saúde pública e dos gastos públicos atualmente direcionados para esta área [8].

No Brasil, estudos realizados no ano de 2010 e publicados pelo Instituto Nacional de Altos Estudos, INAE, revelam a viabilidade econômica, ambiental e técnica para a produção e comercialização de veículos elétricos e híbridos. Esses estudos sólidos demonstram os impactos positivos relativos à economia gerada pelo baixo consumo e elevado desempenho dos automóveis elétricos e híbridos [10].

Ainda no ano de 2010 foram propostos editais de pesquisa e desenvolvimentos do CNPq em tecnologia veicular, baterias e linhas de apoio para pesquisas em empresas nas

---

áreas de desenvolvimento de acumuladores de energia (baterias, super-capacitores) e seus processos de reciclagem e desenvolvimento de partes, peças e equipamentos aplicados a veículos elétricos, híbridos e hidrogênio. Todas essas citações já referidas justificam o estudo e o desenvolvimento de trabalhos contemplando os veículos elétricos [10].

## ***2 OBJETIVOS***

### **2.1 OBJETIVOS GERAIS**

Este trabalho tem como objetivos apresentar as características gerais dos veículos elétricos e compreender o funcionamento básico dos veículos elétricos híbridos dotados de fontes de energia elétrica alternativas e ambientalmente mais amigáveis, como célula a combustível, baterias e supercapacitores. Também faz parte dos objetivos entender os princípios básicos do funcionamento das células a combustíveis e dos supercapacitores.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Este trabalho tem como objetivos específicos propor e realizar a gestão de energia das fontes embarcadas nos veículos elétricos híbridos dotados a fontes alternativas (célula a combustível ou baterias e supercapacitores); modelar e controlar uma fonte de energia de estrutura híbrida composta por conversores estáticos, baseando-se na técnica de controle por planificação (*Flatness based control*).

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Veículos elétricos são veículos automotores que possuem como propulsão um motor elétrico para se movimentarem ou conduzirem pessoas. São constituídos por um sistema primário de energia com uma ou mais máquinas elétricas e um sistema de acionamento e controle. O primeiro carro elétrico foi desenvolvido em 1830 e utilizava baterias não recarregáveis. No entanto, até o final do século XIX, com a produção em massa de baterias recarregáveis, o veículo elétrico se tornou muito utilizado como carros particulares e até mesmo taxis; é ao carro elétrico que se deve o recorde mundial de velocidade de 1899 com 106Km/h [1]. Nos dias atuais as preocupações econômicas e ambientais impulsionaram, de forma mais intensa as pesquisas e desenvolvimento dos veículos elétricos e os investimentos nessa área vem viabilizando o desenvolvimento e pesquisa das tecnologias existentes.

Nos veículos elétricos (VE) mais populares, bancos de baterias são utilizados para fornecer energia ao eixo do veículo. Em relação aos veículos convencionais que possuem motores a Combustão Interna (MCI) os VE's possuem muitas vantagens como a não emissão de poluente, níveis de produção de ruídos baixos e eficiência energética relativamente maior. Entretanto, os VE's são tipicamente rejeitados devido ao alto custo, tamanhos elevados, ciclo de vida das baterias limitados [11]. Esses problemas foram superados com a incorporação de MCI no VE criando uma categoria de veículos híbridos.

Existem vários modelos de veículos elétricos que podem se dividir efetivamente em seis tipos. O primeiro seria o tradicional veículo elétrico a bateria (VEB) sendo o mais popular entre os usuários atualmente. O segundo existente seriam os veículos elétricos híbridos (VEH) que combinam duas ou mais fontes de energia. O terceiro tipo são os veículos elétricos a célula de Hidrogénio (VECH) que vêm se popularizando devido ao intenso investimento no desenvolvimento de tecnologias de células a combustíveis. O quarto são veículos elétricos conectados a linhas elétricas (VELE) amplamente utilizados no transporte público em grandes centros urbanos. A quinta categoria são os veículos

elétricos solares (VES) e por último, a categoria de veículos elétricos com Super Capacitores (VESC) graças ao desenvolvimento de sistemas de estocagem de energia de alta densidade[1].

## 3.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

Veículos elétricos híbridos (VEHs) são veículos nos quais duas ou mais fontes de energia são usadas para o funcionamento do sistema de propulsão. Nos dias atuais os modelos comerciais comumente utilizam motores a combustão interna (MCI) em conjunto com baterias.

Os VEHs podem ser classificados em três tipos diferentes, de acordo com sua arquitetura e o modo pela qual a energia é gerada pelas diferentes fontes e transmitidas para as rodas. São elas: série, paralelo e split [1].

Nos veículos híbridos em paralelo (Figura 1) o motor a combustão interna e o motor elétrico atuam diretamente nos eixos das rodas mediante a uma caixa de acoplamento mecânico (*transmissão*) dos eixos dos dois motores. O motor a combustão interna utiliza as fontes convencionais de energia e o motor elétrico utiliza elementos armazenadores de energia como as baterias. O motor elétrico pode funcionar como um gerador em frenagem regenerativa possibilitando a recarga das baterias.

No veículo híbrido em série (Figura 2) a propulsão é feita por um motor elétrico que é alimentado por duas ou mais fontes de energia. Se uma dessas fontes for um motor a combustão interna é necessário um gerador conectado ao MCI para converter sua energia em energia elétrica e assim ser somada à energia disponível das outras fontes.

A configuração split é basicamente uma variação da configuração em paralelo, pois ela permite alimentar cada eixo por uma fonte de energia diferente.

Os VEH's com MCI tornaram-se uma alternativa interessante para os veículos convencionais, pois possuem a capacidade de reduzir o consumo de combustível fóssil, emissões de poluentes e o número de baterias embarcadas no veículo, além de manter ou aumentar a autonomia [12]. Porém esses veículos possuem os mesmos problemas de baixa eficiência energética e poluição devido ao MCI.

Os avanços tecnológicos da produção e melhoramento das células a combustível estão proporcionando a utilização dessa tecnologia como uma fonte de geração de energia em sistemas embarcados. Veículos elétricos híbridos com células a combustível passam a ser

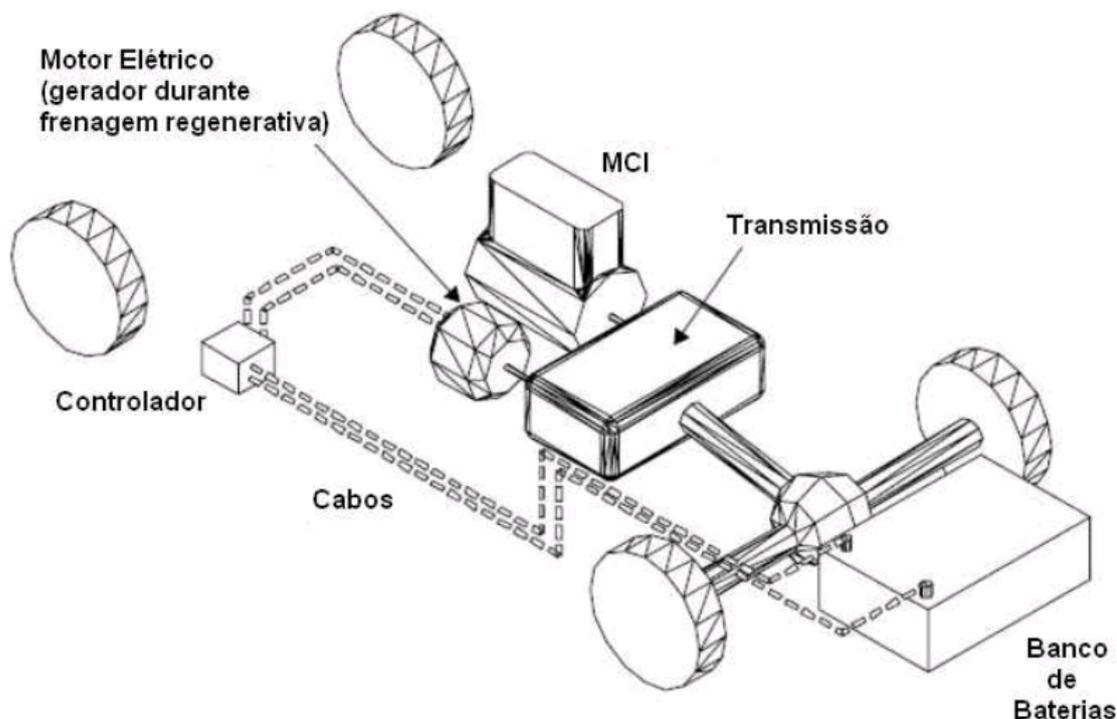


Figura 1: Configuração paralela de um VEH [1]

realidade [13].

### 3.2.1 Veículos Elétricos Híbridos com Célula a Combustível

Atualmente, as células a combustível (CaC's) são reconhecidas como uma das tecnologias mais promissoras para atender os requisitos da futura geração de energia. Entretanto o preço ainda elevado desse equipamento é um dos principais obstáculos da comercialização dos veículos baseados nessa tecnologia. Porém existem duas possibilidades para a redução do custo da célula a combustível. A primeira seria o aumento dos investimentos de produção e incentivos em pesquisas e desenvolvimento. A outra maneira de redução de custo é reduzir o valor da potência da CaC com dispositivos de armazenamento de energia. Sistemas de armazenamento podem ser utilizados para auxiliar a CaC ao fornecimento de energia necessária para o desempenho do veículo [11]. Assim quando o automóvel necessitar de uma alta potência, o dispositivo de armazenamento pode auxiliar a célula a combustível. Hoje em dia os principais tipos de dispositivos de armazenamento são as baterias e supercapacitores. Nos VEH's, a célula a combustível, banco de baterias (BAT) e banco de super capacitor (SC) são geralmente utilizados como fontes de energia limpa

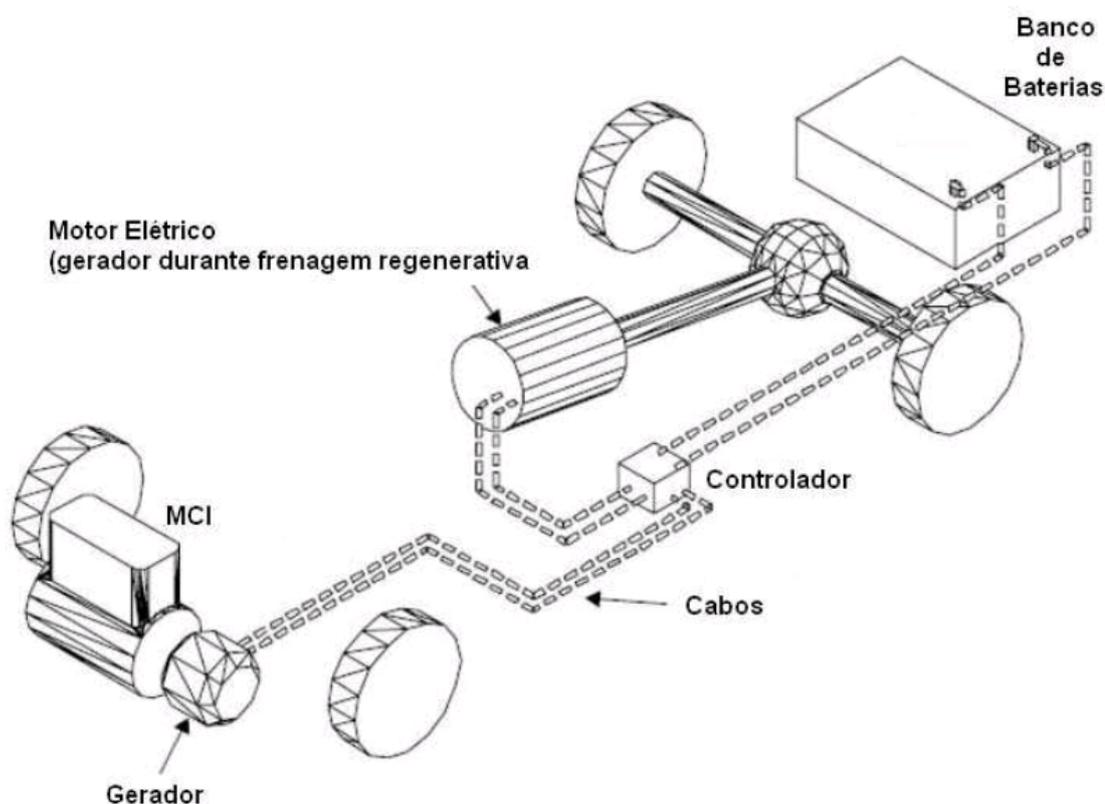


Figura 2: Configuração série de um VEH [1]

[14].

**Células a Combustível:** As células a combustível têm uma baixa eficiência em uma demanda de pequena carga, lenta dinâmica de transferência de energia em situações transitórias e um alto custo por watt. Neste caso é a razão pela qual as CaC's não são usadas isoladamente nos VEHs para satisfazer as exigências de carga, especificamente durante os eventos de arranque e transitório [15]. Em sistemas elétricos embarcados, o controle da tensão do barramento contínuo pode ser complicado, pois as cargas elétricas envolvidas nesse contexto podem absorver ou fornecer um nível elevado de energia em um pequeno espaço de tempo que pode ser caracterizada como uma aceleração ou frenagem de um motor elétrico.

**Baterias:** As Baterias poderiam ser utilizadas como uma fonte de energia auxiliar para os eventos de maior demanda de carga ou regeneração de energia, porém elas apresentam algumas desvantagens tais como: ciclo de vida baixo, longo tempo de recarga, uma densidade de potência baixa, podendo se deteriorar mais rapidamente com descargas elevadas.

**Supercapacitores:** Os supercapacitores em comparação com as baterias e CaC possuem uma rápida dinâmica de transferência e absorção de energia. Esse componente é uma boa opção como elemento armazenador de energia pois pode fornecer e absorver grande quantidade de energia em pequenos intervalos de tempo. Os supercapacitores são excelentes componentes a serem utilizados em fontes híbridas de energia, como mostram os trabalhos [16][17][15][11]

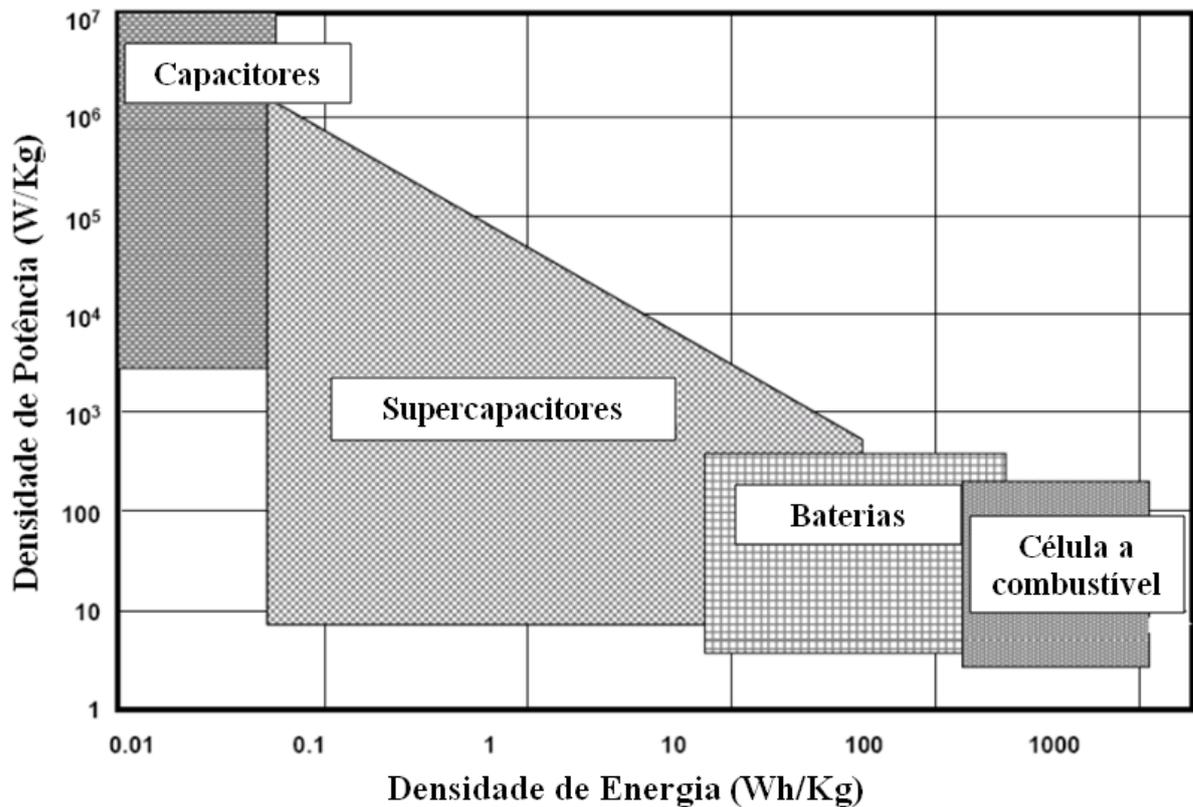


Figura 3: Gráfico de armazenamento e conversão de energia entre alguns dispositivos [2]

Na Figura 3 pode ser observado as diferenças entre os elementos de armazenamento de energia. Observa-se que os super-capacitores estão preenchendo o intervalo que havia entre os elementos de armazenamento. A vantagem da utilização desses equipamentos está relacionada com a capacidade de fornecer uma elevada potência com uma menor energia armazenada quando comparados com as baterias. Outra característica importante é a elevada vida útil e o elevado ciclo de carga e descargas que são no mínimo quinhentas vezes superior a das baterias [18].

A Figura 4 apresenta um veículo elétrico híbrido com célula a combustível e supercapacitores desenvolvido pela *Honda* e disponível no mercado depois de 1999. A *Honda* decidiu combinar a célula a combustível com um super-capacitor, a fim de reduzir as desvantagens da CaC em dinâmicas de elevadas variações de potência [19] [3].

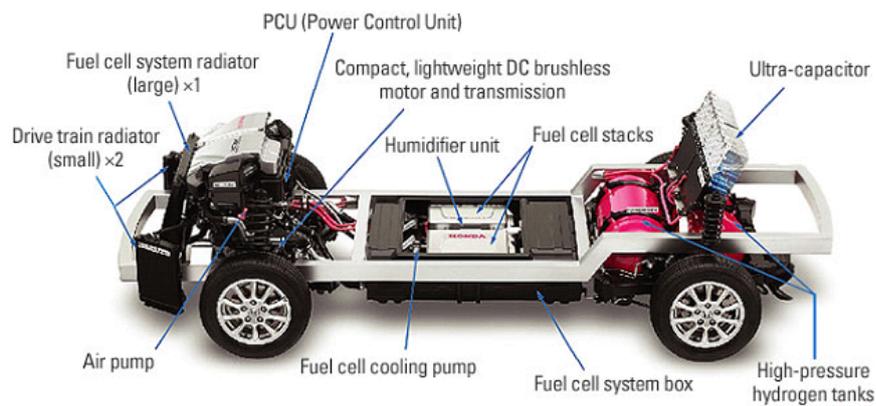


Figura 4: Estrutura do veículo híbrido *FCX* da Honda [3]

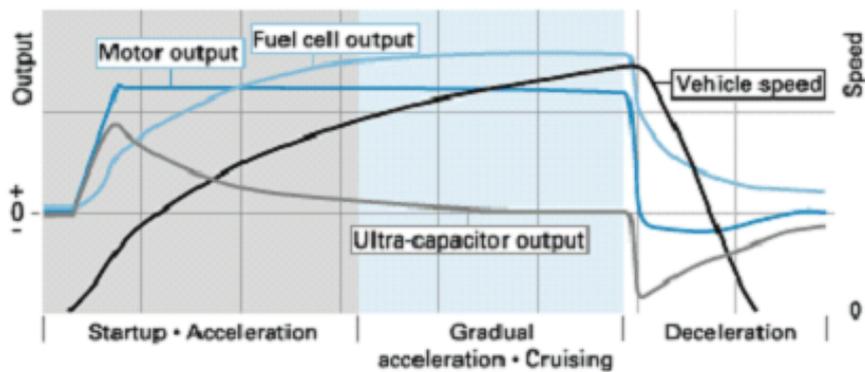


Figura 5: Resposta do veículo *FCX* da Honda em ciclo de funcionamento [3]

Em baixa e média velocidade o veículo *FCX* (Figura 4) pode desenvolver um torque superior aos veículos de combustão interna de mesma classe. A gestão de energia embarcada foi otimizada de tal maneira, que o rendimento global do sistema é de 45%, sendo duas vezes os veículos a combustão e 1,5 vezes os veículos híbridos com motor a combustão. Na Figura 5 pode-se observar a contribuição de potência de cada fonte embarcada.

## 3.3 FONTE E SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA VEÍCULO ELÉTRICO

### 3.3.1 Célula a Combustível

As células a combustíveis existem há muito tempo. As primeiras experiências foram feitas por William Robert Grove em 1838, mas a sua viabilização e real desenvolvimento foram promovidos em 1960 pela Agência Espacial Norte-americana. A NASA necessitava de uma forma de fornecer energia às naves espaciais tripuladas. As células a combustível foram a solução encontrada, pois eram mais seguras que a energia nuclear, mais baratas que a energia solar e mais leves que as baterias [20].

A tecnologia das células a combustível (CaC) ou pilhas a combustível é baseada na transformação de energia química em energia elétrica, utilizando o hidrogênio e o oxigênio como combustível. Obtêm-se como produto da reação, eletricidade e vapor de água. Uma CaC funciona como uma bateria, se continuamente e devidamente alimentada, ou seja, enquanto houver combustível, ela permanece operando.

Os benefícios da utilização desta tecnologia são os mais variados, dentre eles podem-se destacar sua alta eficiência e a não emissão de poluentes quando se utilizam o hidrogênio puro. A diminuição dos custos de energia, aumento da eficácia dos equipamentos, preocupação com o meio ambiente e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis tem incentivado a pesquisa e desenvolvimento das células a combustível em todo o mundo, caracterizando essa tecnologia como uma fonte de energia alternativa [4].

Fonte de energia abundante, o hidrogênio é o elemento mais comum do universo que pode ser obtido por diversas fontes de energia renováveis, mas também a partir de combustíveis fósseis, porém com um impacto ambiental inferior. O Brasil poderá usufruir de uma posição privilegiada na produção desse novo e promissor vetor energético, pois a obtenção do hidrogênio pode ser feita pelas inúmeras reservas de gás natural, das hidroelétricas, energia fotovoltaica graças à radiação solar em abundância e do agronegócio de cana-de-açúcar que é bem desenvolvido [4].

As células a combustíveis são mais eficientes para a obtenção de energia do que a queima de combustíveis fósseis. Atualmente, muitas têm uma eficiência de até 60% e, com algumas adaptações tecnológicas, poderiam se aproximar de 100%. Para fins de comparação, as turbinas a gás têm uma eficiência de cerca de 40-50%, e motores de combustão interna, de 10-20% [4]. A energia proveniente do hidrogênio tem um mercado promissor.

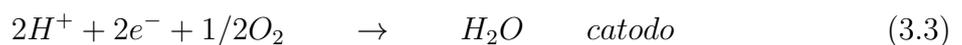
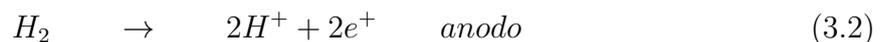
A célula a hidrogênio oferece uma solução para a geração de energia no próprio local de consumo, desde uma indústria, residência, centros comerciais, além de sua utilização em automóveis, aviões, motos, ônibus e equipamentos portáteis, tais como o telefone celular e os laptops.

### 3.3.1.1 Princípio de Funcionamento das Células a Combustíveis

A célula de combustível é um dispositivo de conversão de energia que converte diretamente a energia química em energia elétrica sem a necessidade de nenhum processo térmico ou mecânico. A reação química é uma oxirredução eletroquímica. A reação é feita entre o hidrogênio e o oxigênio para produzir eletricidade, água e calor. A reação global é apresentada a seguir [21].



Essa reação é realizada nas estruturas essenciais da pilha combustível, que são os dois eletrodos (o catodo e o anodo), que serão os condutores dos elétrons, separados por uma membrana eletrolítica sólida que será o condutor dos prótons. De forma mais precisa, as reações em seguida acontecem nos dois eletrodos [22][4].



A reação de oxidação do hidrogênio (anodo) e a redução do oxigênio (catodo) é feita na interface Membrana Eletrolítica/Eletrodo com a presença da platina como um catalisador.

O princípio de funcionamento pode ser resumido pela Figura 6. Algumas células podem ter a membrana eletrolítica líquida ou sólida, podem funcionar em alta ou em baixa temperatura e podem operar de forma reversível. As CaC's que operam em baixa temperatura exigem catalisadores de metais nobre, tipicamente a platina. Em princípios uma célula de combustível pode funcionar com diferentes tipos de combustível e oxidante. Porém, o hidrogênio apresenta uma maior eficiência por ser um reagente mais ativo que os demais combustíveis, tais como hidrocarbonetos ou álcool. O oxigênio é o melhor oxidante por ser altamente reativo e existir em abundância.

**Tipos de Células a Combustível** As diferenças entre os tipos de célula a combustível são caracterizadas pelas diferentes membranas utilizadas. A temperatura de funcio-

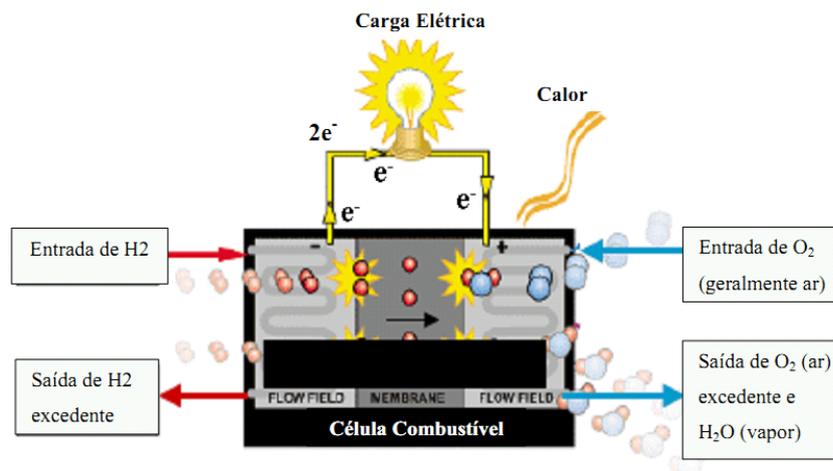


Figura 6: Funcionamento de uma célula a combustível

namento é também o fator que diferencia as células, classificando em célula a combustível de alta ou baixa temperatura. Na prática, os sistemas de funcionamento são mais simples em baixa temperatura. Os principais tipos de células são citados a seguir:

- Célula Alkalina AFC (Alkaline fuel cell)
- Célula de membrana de trocas de prótons PEMFC ( Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- Célula a metanol direto DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)
- Célula a carbonato fundido MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)
- Célula a óxido sólido SOFC ( Solid Oxid Fuel Cell)

Dentre os tipos citados a célula PEMFC se destaca por funcionar em baixa temperatura ( $70^{\circ}$  à  $100^{\circ}\text{C}$ ) e, portanto, mais simples. Ela chamou a atenção industrial em diferentes setores onde suas propriedades favorecem as aplicações em portáteis, transporte automotivo, co-geração de baixa potência. No transporte automotivo, a PEMFC apresenta a vantagem de não emitir nenhum poluente no veículo.

A tensão teórica sem carga de uma célula a combustível ideal é de 1,23V [23]. Já em sistema real, a tensão medida em circuito aberto é da ordem de 1V. A tensão da CaC com carga é de 0,5V à 0,7V. Portanto para atingir uma tensão mais elevada é necessário colocar em série várias células e em forma banco (stack). Normalmente utiliza-se de 100 à 120 células fornecendo uma tensão de saída entre 60 à 80V. A corrente fornecida é diretamente proporcional à superfície das células que é de  $0,5 \text{ A}\cdot\text{cm}^2$  [24].

### 3.3.1.2 Modelagem Simples e Característica de uma Célula a Combustível

A tensão de saída  $V_c$  de uma célula a combustível é descrita pela equação 3.4 que possui quatro termos que podem ser caracterizados como: tensão de circuito aberto  $E$ , tensão de ativação  $V_{ativ}$ , tensão ôhmica  $V_{ohm}$  e por último a tensão de concentração  $V_{conc}$  [21] [22] [25] [4]. A curva característica de tensão da CaC em função da densidade de corrente fornecida é apresentada na Figura 10.

$$V_c = E - V_{ativ} - V_{ohms} - V_{conc} \quad (3.4)$$

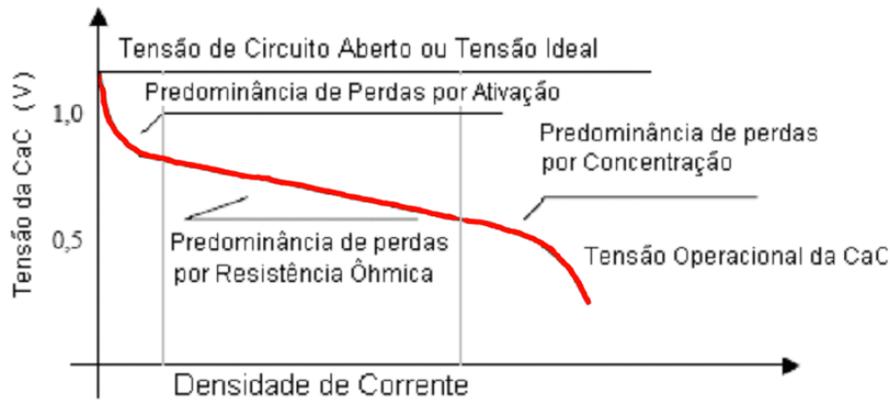


Figura 7: Curva de tensão por densidade de corrente [4]

As perdas por ativação são devidas ao início das reações químicas existentes nos eletrodos. Uma energia é usada para quebrar e construir as ligações químicas nos eletrodos da célula a combustível. A relação matemática das perdas por ativação é dada pela equação de Tafel 3.5. Onde  $I_{FC}$  é a corrente fornecida pela CaC,  $i_n$  é a corrente de fuga interna entre a membrana prototica,  $i_o$  é a corrente característica, em circuito aberto, de trocas eletrodos/membrana e  $A$  é uma constante de Tafel [21].

$$V_{act} = A \ln\left(\frac{I_{FC} + i_n}{i_o}\right) \quad (3.5)$$

As perdas ôhmicas são relacionadas às resistências dos eletrodos, para a passagem dos elétrons, e das membranas protóticas, a passagem dos prótons. A equação 3.6 relaciona as perdas ôhmicas.  $R_m$  é a resistência total da CaC.

$$V_{ohms} = R_m(I_{FC} + i_n) \quad (3.6)$$

A consumação dos gases empobrece as misturas gasosas e diminui a pressão parcial do gás. Esta redução de pressão é devida a corrente demandada pela carga e da característica do circuito de gás. A equação 3.7 representa as perdas por concentração. A queda de tensão é dada em função de uma corrente limite  $i_L$ , no qual todo o combustível seria utilizado (Pressão dos gases igual a zero). A constante  $B$  é a constante de transferência de massa que depende do ponto de funcionamento da célula.

$$V_{conc} = -B \ln\left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L}\right) \quad (3.7)$$

Vários modelos podem ser desenvolvidos para estudar o funcionamento de uma pilha a combustível. Um modelo deve ser simples, preciso e que permita a predição do comportamento elétrico nos regimes estáticos e dinâmicos. A representação mais simples de uma célula a combustível é na forma de um modelo elétrico de entrada e saída que pode aproximar seu comportamento em uma região de funcionamento. Pode-se utilizar um modelo baseado em uma fonte de tensão em série com uma impedância, como na Figura 8. Essa impedância é constituída por um capacitor e uma resistência  $R_t$  para caracterizar os efeitos de ativação nos eletrodos (Figura 9). A resistência  $R_m$  representa a resistência total da célula (eletrodo e membranas) descrevendo assim a região ôhmica da CaC. Nesse modelo o fenômeno de concentração não é representado.

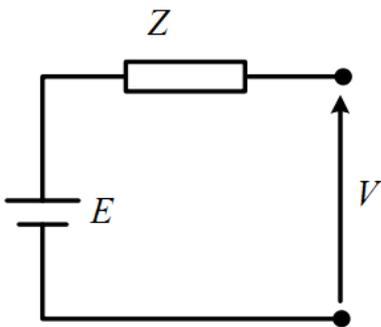


Figura 8: (a) Modelo simples de uma célula a combustível

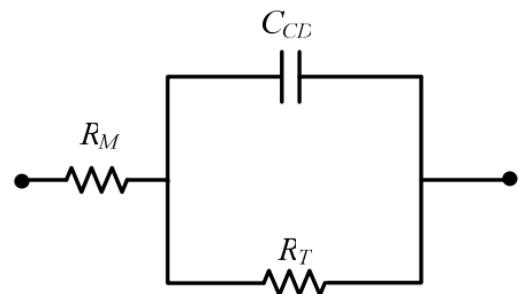


Figura 9: (b) Impedância do modelo

### 3.3.2 Super Capacitores

Os recentes desenvolvimentos das tecnologias para os super capacitores proporcionaram elevada energia específica e uma alta potência específica para esses dispositivos. Devido a capacitância de várias centenas de Farads e resistência série menor que miliohm, estes novos componentes se tornaram adequados para o armazenamento de energia nas

aplicações de eletrônica de potência, em especial no domínio da gestão de energia elétrica embarcada (fontes híbridas de energia, frenagem regenerativa)[16][17][26].

O princípio da dupla camada eletroquímica foi descoberta pelo físico Helmholtz nos anos 1850. Ele observou que a aplicação de uma diferença de potencial sobre os eletrodos colocados em contato com uma solução eletrolítica provocava um reagrupamento dos íons da solução na superfície dessa interface [22]. A dupla camada eletroquímica ficou no interesse das atividades da sociedade eletroquímica por uma centena de anos, pois por razões tecnológicas os supercapacitores só vieram a aparecer 100 anos depois em 1950 com as idéias de renovação dos sistemas de armazenamento de energia [16].

### 3.3.2.1 Princípio de Funcionamento

A tecnologia dos super capacitores revolucionaram a família dos capacitores. Capacidades de centenas de farads são obtidas com os super capacitores. A diferença fundamental de funcionamento da tecnologia eletrolítica se compreende na ausência aparente da camada dielétrica, (Figura 10).

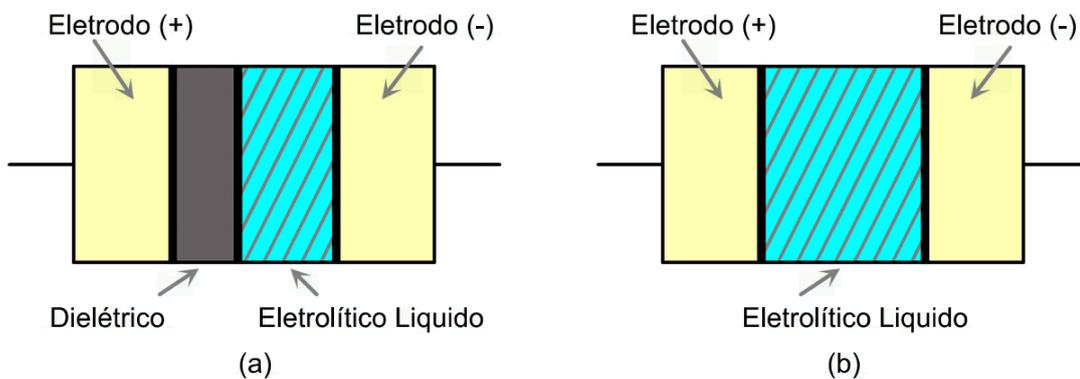


Figura 10: Capacitor eletrolítico (a) e Supercapacitor (b)

O princípio base de funcionamento reside nas propriedades capacitivas na interface entre o condutor sólido e o condutor líquido iônico, propriedade descoberta por Hermann Von Helmholtz em 1853 [26][16]. O armazenamento da energia se distribui nos íons do eletrolítico que cria na interface dos condutores e do eletrolítico, uma zona de cargas chamada de dupla camada elétrica de espessura nanométricas, (Figura 11).

Para explorar melhor a potencialidade dessa dupla camada elétrica em termos de energia específica e capacidade volumétrica, é conveniente aumentar a superfície de contato entre eletrodo e eletrolítico sem aumentar as dimensões totais do sistema, como ilustrado

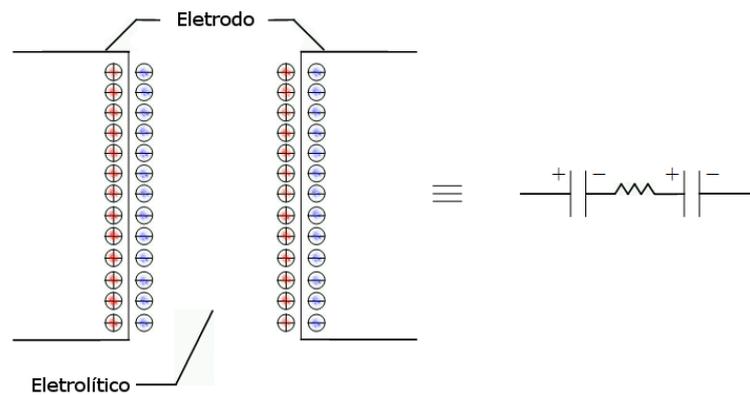


Figura 11: Princípio de funcionamento de um supercapacitor.

na Figura 12. Isso é realizado através de eletrodos de matérias poroso de grande superfície específica como o do carbono ativo que possui uma superfície superior à  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  [26].

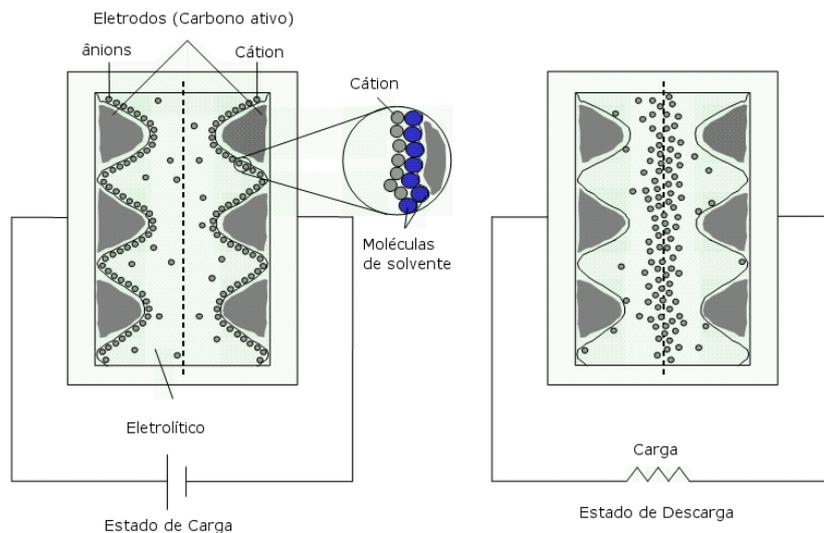


Figura 12: Estrutura interna dos supercapacitores de carbono ativo

### 3.3.2.2 Modelo de Dois Ramos

O modelo de dois ramos (Figura 14) proposto por R. Bonert e L.Zubieta [27][28] se baseia na energia eletrostática do super capacitor dividido em duas partes:

- Energia rapidamente armazenada ou fornecida;
- Energia lentamente armazenada ou fornecida.

A primeira é chamada de ramo principal e descreve o comportamento de carga e descarga, já a segunda parte é o ramo lento e complementa o primeiro ramo com a

aproximação da redistribuição da energia depois dos eventos de carga e descarga. O circuito do modelo é ilustrado na Figura 14.

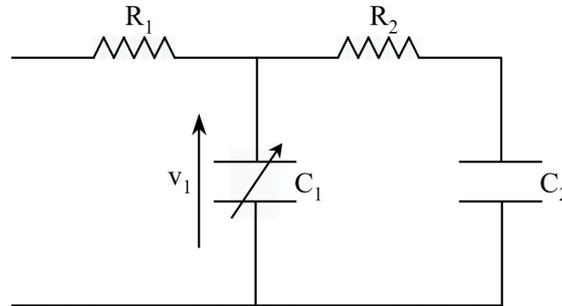


Figura 13: Modelo de dois ramos de um supercapacitor.

A capacitância do ramo principal é dada de acordo com a equação 3.8.

$$C_1(V_1) = C_o + C_v V_1 \quad (3.8)$$

A obtenção dos parâmetros dos ramos principal e lento é feito por meio de uma carga completa a corrente constante, Figura 14. As características das curvas nos permite calcular os parâmetros do ramo principal ( $R_1$  e  $C_1$ ) e os parâmetros do ramo secundário ( $R_2$  e  $C_2$ ). Esse processo de identificação se baseia na hipótese de que os dois ramos possui uma constante de tempos muito distantes ( $R_2 C_2 \gg R_1 C_1$ ) [16].

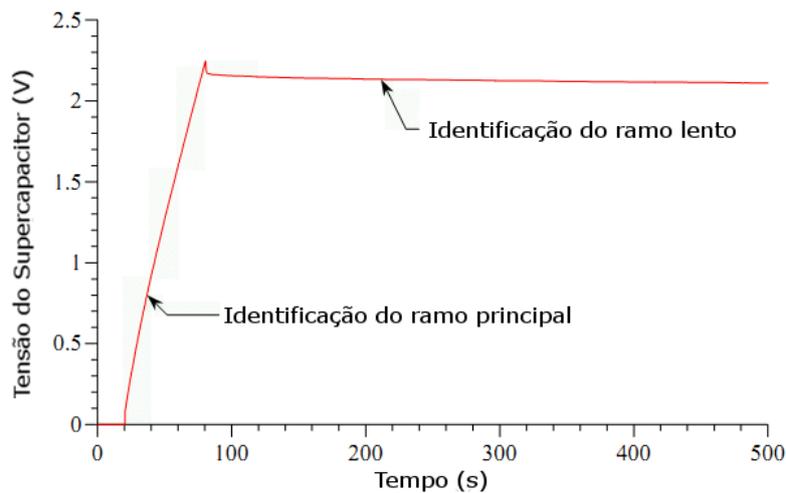


Figura 14: Princípio de identificação dos parâmetros.

### 3.4 FONTE HÍBRIDA DE ENERGIA

Um sistema de energia híbrido é caracterizado pela associação de dois ou mais dispositivos (que contenha no mínimo um elemento de armazenamento) com a finalidade de combinar as vantagens específica de cada um e minimizar as suas inconveniências. Sistemas híbridos podem conter diferentes fontes de energia de diferentes naturezas, renováveis e/ou não renováveis como ilustrado na Figura 15 [25].

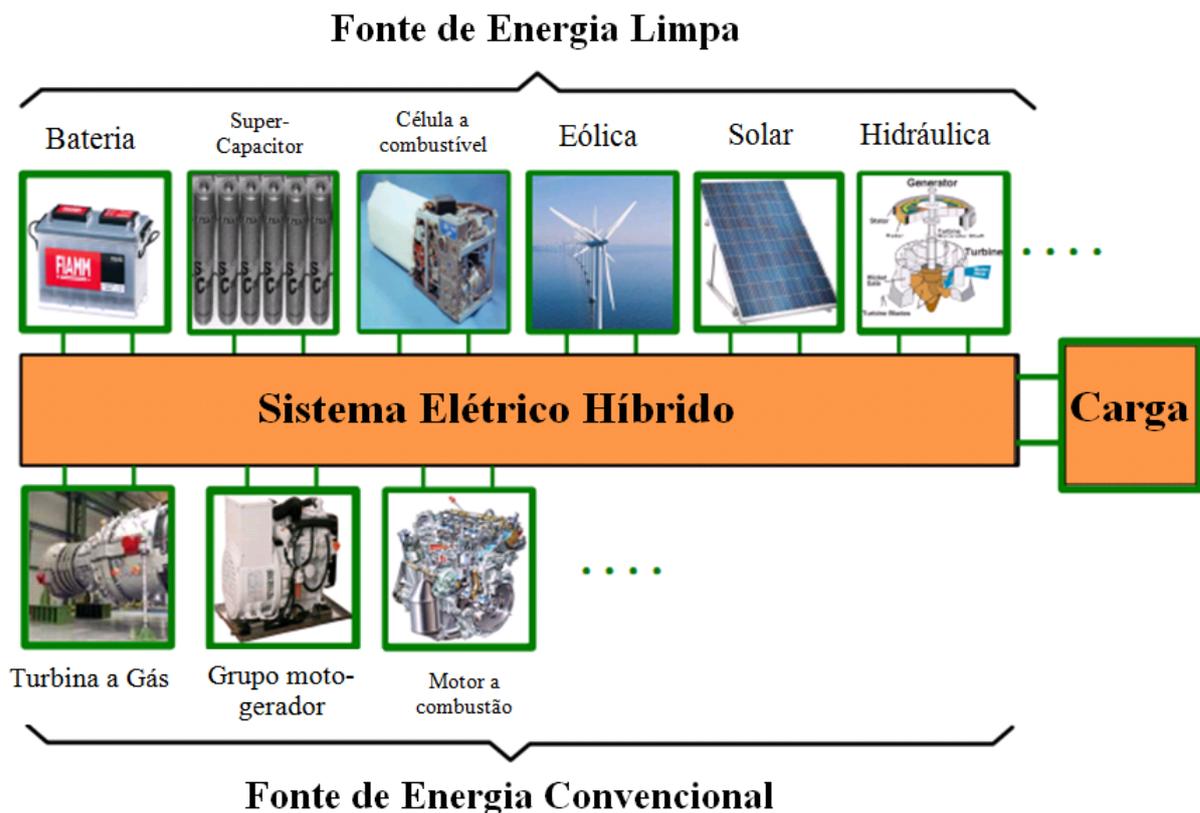


Figura 15: Diferentes fontes de energia utilizadas nos sistemas híbridos

A combinação entre baterias ( e/ou células a combustível) com um super capacitor pode minimizar o problema de baixa energia específica das baterias (e/ou células a combustível) e a baixa potência específica dos super capacitores [22]. No trabalho realizado por J. M. Corrêa [21] foi explicado o fenômeno de afundamento de tensão que ocorre nas células a combustível devido a diversos fatores, tais como: temperatura do banco de célula, quantidade de hidrogênio fornecido, sistemas de circulação de oxigênio, entre outros. Este fenômeno acontece principalmente quando ocorre um degrau de carga elevada (Figura 16), gerando um afundamento acentuado na tensão em regime transitório, prejudicando o fornecimento da potência exigida e até mesmo ocasionando uma degradação prematura da célula a combustível [29]. O afundamento de tensão pode ser considerado como uma

atraso de primeira ordem existentes nas tensões de ativação e concentração da célula a combustível [21].

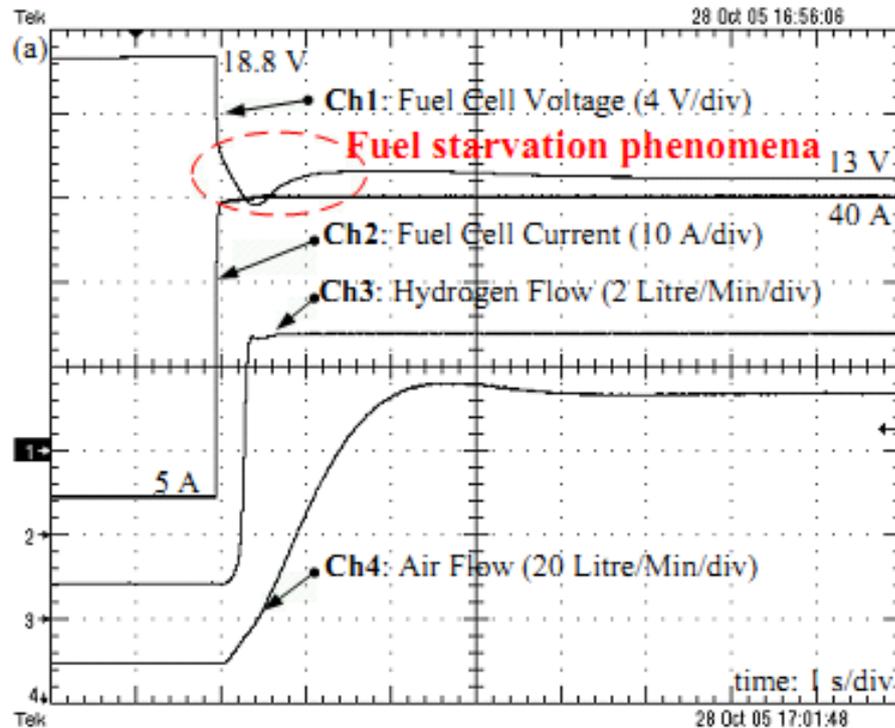


Figura 16: Resposta dinâmica da célula a combustível [2]

No contexto dos veículos elétricos híbridos, a fonte deve ser capaz de fornecer e absorver uma grande quantidade de energia em curto espaço de tempo (por exemplo, aceleração e desaceleração do veículo). Para que o sistema funcione corretamente o dimensionamento da fonte deve suprir as exigências de potência tanto no regime transitório quanto no permanente, isso reflete num custo final de dimensionamento mais elevado. Um sistema híbrido com célula a combustível, como fonte de energia principal e super capacitor como fonte de energia secundária, combinam as vantagens das duas tecnologias (energia específica elevada e alta potência específica por um período de tempo considerável), permitindo assim desmembrar o dimensionamento em potência média e potência de transitório, fornecendo um ganho expressivo em volume e massa do sistema final.

### 3.4.1 Funcionamento de uma Fonte Híbrida de Energia

A utilização de diferentes fontes de energia em um mesmo barramento necessita de uma estratégia de controle que gerencie o fluxo de energia entre as fontes e que proporcione o melhor desempenho do sistema. O gerenciamento do fluxo de energia torna-se um fator fundamental em veículos híbridos.

Os possíveis modos de operação do sistema híbrido, composto por uma célula a combustível e super capacitor são:

**Modo normal:** Potência de carga é positiva e menor que a potência máxima da fonte principal (célula a combustível). Nesse modo a fonte principal fornece toda a potência demandada pela carga e a fonte secundária (Super capacitor) se mantém carregado ou carregando.

**Modo sobrecarga:** A potência da carga é positiva e é maior que a potência fornecida pela fonte principal. Nesse modo a fonte secundária fornece uma potência adicional ao barramento CC compensando o déficit de energia, garantindo o controle da tensão na carga. O capacitor se encontra no modo de descarga.

**Modo regenerativo:** A Potência da carga é negativa nesse modo. O controle do conversor CC da fonte secundária regula a tensão do barramento permitindo a absorção da energia pelo super capacitor.

Diferentes estratégias de controle foram propostas para o gerenciamento da energia de uma fonte híbrida de energia [14] [22] [13] [11] [30] [29] [31] [32] [33] [2]. Em alguns trabalhos [13] [2] [30] propuseram algoritmos de controle que se adaptavam nos diferentes modos de operação de carga, ou seja, a mudança de um modo de operação para o outro é necessário comutar o algoritmo de controle. Esse fato pode provocar um fenômeno de trepidação próxima à região de comutação [34] ou provocar uma demanda instantânea maior de corrente de todas as fontes [22].

Os trabalhos [14] [22] [33] [32] [34] [35] utilizaram uma estratégia de controle baseada na técnica por planificação (*Flatness Control*) que pode controlar a dinâmica de diversas fontes de energia em um sistema híbrido através da energia eletrostática do capacitor no barramento CC e elimina os problemas mencionados. A estratégia de controle baseado no Flatness foi escolhida por causa da sua utilidade em situações que a geração de uma trajetória explícita é necessária[36]. Se o comportamento do sistema plano for determinado pelas suas saídas planas, pode-se planejar a trajetória das saídas e determinar as entradas adequadas [22].

### 3.4.2 Motores Elétricos

O motor elétrico em veículos híbridos possui uma finalidade dupla, pois além de fornecer o torque para a propulsão do veículo eles também podem gerar energia, ou seja, o motor elétrico se transforma em um gerador nos momentos de frenagem o que permite carregar os elementos de armazenamento de energia. Portanto, o motor elétrico pode ser visto como uma carga que hora consome ou gera eletricidade. Nos veículos elétricos atuais utilizam-se geralmente motores elétricos de corrente alternada (Motores CA) de dois tipos, que são os motores CA de ímã permanente e de indução.

As vantagens dos motores elétricos estão nas suas propriedades de torque constante em baixa velocidade e potência constante em grandes velocidades. Características tais como alto torque em altas velocidades, elevada rotação de eixo em relação à velocidade base, alta eficiência em toda região de trabalho, menor volume e mais leves são fatores que sobrepõem os atuais motores a combustão [37].

Os motores CA de ímã permanente são máquinas síncronas que proporcionam um controle de velocidade mais preciso. Possuem uma maior densidade de potência, devido o alto fluxo magnético, em relação às máquinas de indução. Os motores CA de ímã permanente devem trabalhar em temperaturas baixas necessitando de um complexo sistema de refrigeração enquanto que os motores CA a indução podem ser refrigerado a ar.

### 3.4.3 Controle Flatness

De forma clássica, as técnicas de controle consistem em conhecer o inverso do modelo dinâmico do sistema que se pretende controlar. A dinâmica inversa do sistema é usada para obter os estados de saídas através dos estados de entradas. Na maioria das técnicas de controle o objetivo é encontrar um modelo matemático para a obtenção da solução dinâmica inversa do sistema, pois a dinâmica inversa possibilita o controle em malha fechada. De forma geral, lineariza-se o sistema em torno de um ponto de funcionamento para a aplicação dos métodos de controle linear. Em sistemas mais complexos somente o método de linearização não é suficiente para solucionar o problema de controle. Para resolução desse problema, uma nova classe de sistema chamado de *Sistema Plano* foi apresentada em 1992 por M. Fliess, J. Lévine, P. Martin et P. Rouchon [38], no qual a trajetória do estado de um sistema não linear pode ser completamente caracterizada pelas suas saídas, chamadas de saídas planas, e com suas derivadas sucessivas.

O controle Flatness é útil em situações onde é necessário a geração explícita de trajetória das variáveis de controle. Recentemente, foi estudado em várias aplicações por ser uma técnica de controle robusta e que permite o planejamento de trajetórias [15] [38] [33]. Outra vantagem ocorre quando as saídas planas do sistema são utilizadas, a trajetória é controlada, a evolução da trajetórias das variáveis de estado são bem conhecidas mesmo nos estados transitórios[39].

### 3.4.3.1 Definição do Controle Flatness

Um sistema plano é aquele onde todas as variáveis de estado e variáveis de comando podem ser expressas em função da saída plana bem como um número finito de suas derivadas sem integração das equações diferenciais [38]. O comportamento dos sistemas planos é determinado pela sua saída, sendo possível planificar a trajetória desejada das saídas e determinar o controle do sistema. O sistema não linear (3.9) é dito plano se existir uma saída plana  $Y$  de dimensão  $m$  e dois inteiros  $r$  e  $s$  que possam ser aplicados na forma da equação 3.10 [22].

$$\dot{x} = f(x, u); \quad (3.9)$$

Com o vetor de estado  $x \in \mathbf{R}^n$  e o vetor de saída  $u \in \mathbf{R}^m$ .

$$\begin{cases} y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_m) = \phi(x, u, \dot{u}, \dots, u^s) \\ x = \varphi(y, \dot{y}, \dots, y^r) \\ u = \psi(y, \dot{y}, \dots, y^{r+1}) \end{cases} \quad (3.10)$$

Todo comportamento dinâmico do sistema é dado pelas suas saídas. Qualquer trajetória do sistema será definida por 3.11:

$$\begin{cases} x = \varphi(y, \dot{y}, \dots, y^r) \\ u = \psi(y, \dot{y}, \dots, y^{r+1}) \end{cases} \quad (3.11)$$

A dimensão da saída plana é igual ao numero de comandos do sistema. Não existe uma parametrização única da saída, sempre se pode achar saídas planas procedendo de uma interpretação física do sistema [40].

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 SISTEMA DE FONTE HÍBRIDA PROPOSTO

O sistema híbrido proposto possui a topologia ilustrada na Figura 17. Esse sistema é composto por um conversor boost isolado e dois boost não isolados em cascata. A potência de saída da fonte é de 3kW com tensão do barramento de 400V.

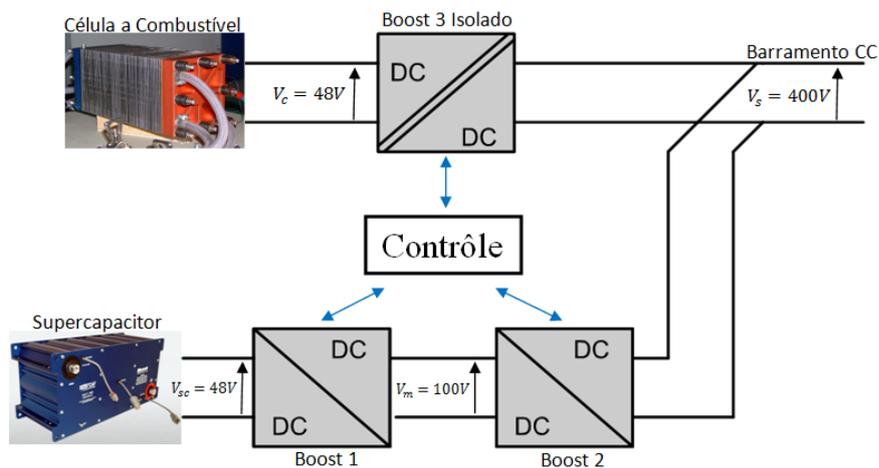


Figura 17: Topologia da fonte híbrida

A célula a combustível é a fonte principal de energia, sendo o super capacitor a secundária. A tensão nominal de cada fonte é de 48 volts. O super capacitor possui uma faixa de tensão permissível que varia entre 24 volts quando descarregado a 50 volts quando completamente carregado.

#### 4.1.1 Conversor Boost não Isolado

Para a fonte secundária de energia, dois conversores Boost's reversíveis não isolados conectados em cascata serão usados. Esta estrutura necessita de uma tensão intermediária de 100V no capacitor  $C_m$  entre os Boost's (Figura 18).

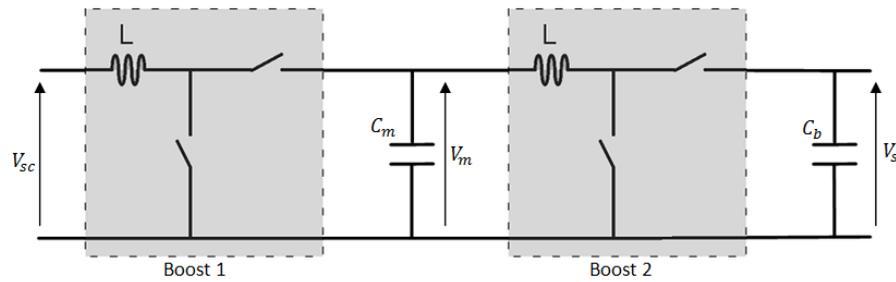


Figura 18: Conversor Boost em cascata

Esta configuração em cascata é necessária para proporcionar uma elevada relação de transformação (transformação de 48V para 400V, relação de transformação de 8,33). O elemento de armazenamento conectado ao conversor será um super capacitor com tensão variável. A relação de transformação é portanto mais elevada quando o capacitor estiver descarregado (400/25 no máximo).

#### 4.1.2 Conversor Boost Isolado

Um conversor boost isolado permite isolar galvânicamente o sistema de elétrico e favorecer a reversibilidade da potência. A estrutura do boost isolado com transformador permitirá ter uma alta relação de transformação para a elevação da tensão no barramento CC (400V =>relação 400/48=8,33). Estruturas do tipo Flyback, Forward e Push-Pull são estruturas com transformadores mas são dificilmente reversíveis e não são adaptados a potência desejada na saída (3kW). Portanto a escolha de uma conversor em *Dual H-Bridge* favorece a previsibilidade. Na Figura 19 tem-se uma estrutura básica do boost isolado.

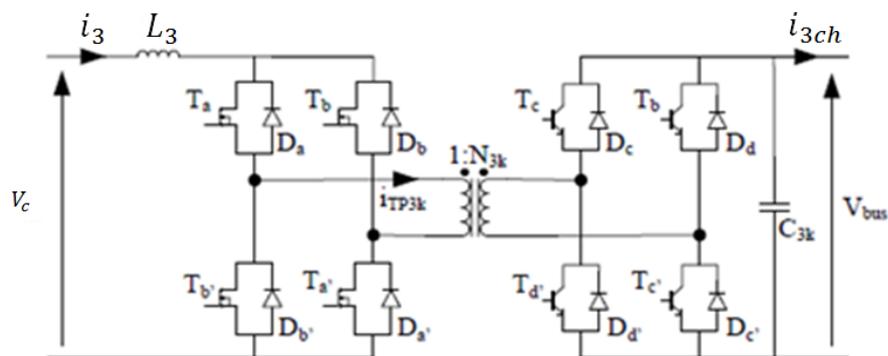


Figura 19: Conversor Boost isolado

A forma de acionamento do conversor boost isolado é representada na Figura 20.

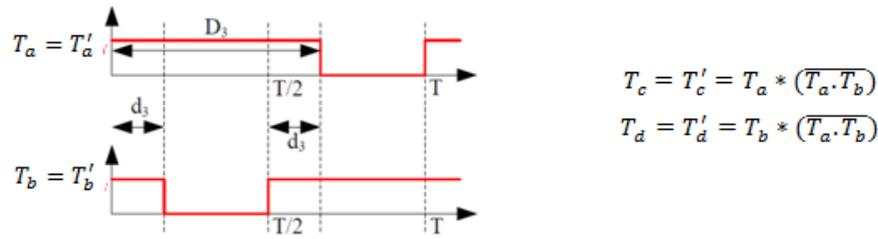


Figura 20: Comando do conversor Boost isolado

A definição de comando acima favorece a obtenção de um modelo matemático idêntico ao modelo do boost clássico com uma constante de transformação  $N$  dada pelo transformador (4.1).

$$\begin{cases} L \frac{di_l(t)}{dt} = v_e(t) - [1 - d(t)] \frac{v_s(t)}{N} \\ C \frac{dv_s(t)}{dt} = [1 - d(t)] \frac{i_l(t)}{N} - \frac{v_s(t)}{R_{ch}} \end{cases} \quad (4.1)$$

### 4.1.3 Princípio do Controle para Fonte Híbrida

O controle da fonte híbrida é baseado na noção de *planificação* como nos trabalhos [41] [35] [39] [15]. Nesses trabalhos observam-se claramente que os Boost's 1 e 2 da Figura 17 são um sistema plano. Para o Boost isolado 3 da mesma Figura, deve-se verificar sua equação 4.2.

$$\begin{cases} L_3 \frac{di_l(t)}{dt} = v_e(t) - [1 - d_3(t)] \frac{v_s(t)}{N_3} \\ C \frac{dv_s(t)}{dt} = [1 - d_3(t)] \frac{i_l(t)}{N_3} - \frac{v_s(t)}{R_{ch}} \end{cases} \quad (4.2)$$

A equação do Boost isolado é similar ao do boost clássico com uma constante  $\frac{1}{N_3}$  a mais. Essa evidência é muito vantajosa pois proporciona a utilização da mesma técnica de controle para as duas estruturas. Essa semelhança é devida a escolha do sinal de comando do boost isolado explicado anteriormente. Outra particularidade é a característica reversível e que independente do sentido do fluxo de potência não necessita modificar o algoritmo de comando, o qual sempre será o mesmo como apresentado na Figura 20.

#### 4.1.3.1 Malha Externa: Controle de energia

A energia armazenada nos dois capacitores  $C_m$  e  $C_s$  permite o controle das suas tensões associadas  $V_m$  e  $V_s$  [15]. Fazendo a hipótese, facilmente verificável, que a energia armazenada nos elementos magnéticos é muito inferior a energia armazenada nos elementos

eletrostáticos  $\frac{1}{2}L.I^2 \ll \frac{1}{2}C.V^2$ . Portanto a regulação de energia se transforma em uma regulação da tensão dos capacitores. Sabendo-se que a dinâmica da malha de corrente é largamente mais rápida que a malha de energia, então a corrente convergirá para a sua referência.

Para ser rigoroso, do ponto de vista das perdas nos conversores, esse trabalho baseia-se nos estudos de Shahin [42] realizados nos laboratórios GREEN sobre a modelagem das perdas em um conversor. De acordo com Shahin todas as perdas em um conversor podem ser modeladas por uma resistências série  $r_s$  na entrada e uma resistência paralela  $r_p$  na saída, ambas resistências são não lineares. A título de simplificação adota-se neste trabalho resistências série e paralela constantes.

Escolhendo a energia armazenada nos capacitores como saída plana, definida por (4.3) e (4.4).

$$y_m = \frac{1}{2}C_m V_m^2 \quad (4.3)$$

$$y_s = \frac{1}{2}C_s V_s^2 \quad (4.4)$$

Definindo a transferência de potência na estrutura como ilustrado na Figura 21.

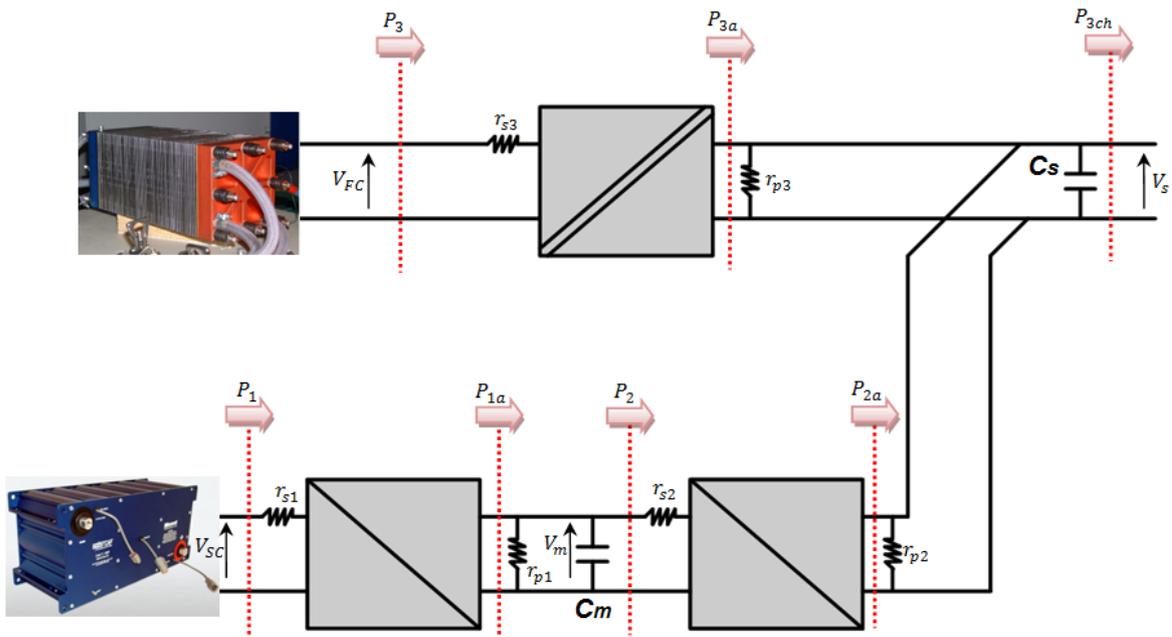


Figura 21: Transferência de potência na estrutura da fonte híbrida.

A partir da escolha das variáveis de saída (4.3) e (4.4) obtêm-se a função  $\phi$  4.5.

$$\begin{cases} \phi_1(y_m) = V_m = \sqrt{\frac{2y_m}{V_m}} \\ \phi_2(y_s) = V_s = \sqrt{\frac{2y_s}{V_s}} \end{cases} \quad (4.5)$$

Com a análise da Figura 21 deduz-se as variáveis para o comando para a malha de energia (4.6) e (4.7). A energia eletrostática ( $Y = (y_m, y_s)$ ) nos capacitores  $C_m$  e  $C_s$  é a saída plana do sistema. O comando  $u$  é expresso pelas saídas planas e suas derivadas. As derivadas das saídas são obtidas facilmente por uma análise física do sistema.

$$\dot{y}_m = P_{1a} - \frac{V_m^2}{r_{p1}} - P_2 \quad (4.6)$$

$$\dot{y}_s = P_{3a} - \frac{V_s^2}{r_{p3}} + P_{2a} - \frac{V_s^2}{r_{p2}} - P_{ch} \quad (4.7)$$

As potências de saída (4.9) dos Boost's, que são os comandos  $\psi_m$  e  $\psi_s$ , são obtidas a partir da resolução da equação (4.8) para as potências de entrada  $P_1$  e  $P_2$ .

$$\begin{cases} P_{1a} = P_1 - r_{s1} \frac{P_1^2}{V_{sc}^2} \\ P_{2a} = P_2 - r_{s2} \frac{P_2^2}{V_m^2} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\begin{cases} \psi_m(y_1, \dot{y}_1) = P_1 = 2P_{1max} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{P_{1aref}}{P_{1max}}}\right) \\ \psi_s(y_2, \dot{y}_2) = P_2 = 2P_{2max} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{P_{2aref}}{P_{2max}}}\right) \end{cases} \quad (4.9)$$

Com:

$$\begin{cases} P_{1max} = \frac{V_{sc}^2}{4r_{s1}} \\ P_{2max} = \frac{V_m^2}{4r_{s2}} \end{cases} \quad (4.10)$$

e:

$$\begin{cases} P_{1ref} = \dot{y}_m + P_2 + \frac{V_m^2}{r_{p1}} \\ P_{2ref} = \dot{y}_s + P_{3aref} + \frac{V_s^2}{r_{p3}} + \frac{V_s^2}{r_{p2}} + P_{ch} \end{cases} \quad (4.11)$$

**Determinação da trajetória das saídas planas:** Para a planificação da trajetória, em um caso especial conhecida como trajetória parada-parada onde as variáveis de referência estão em repouso no estado inicial e final, utiliza-se um filtro clássico de segunda ordem com ganho unitário [41][25][15]. A equação do filtro é dada a baixo.

$$H(s) = \frac{w_n^2}{S^2 + 2\xi w_n S + w_n^2} \quad (4.12)$$

Uma lei de controle da forma 4.13 é necessária para corrigir as perturbações e imperfeições da modelagem e garantir o acompanhamento exponencial assintótico da trajetória [32].

$$(\dot{y}_i - \dot{y}_{iref}) + K_i(y_i - y_{iref}) + K_{ii} \int (y_i - y_{iref}) dt = 0 \quad (4.13)$$

onde  $i$  é um índice correspondente a cada boost. As constantes  $K_i$  e  $K_{ii}$  são os parâmetros do polinômio característico do controlador em malha fechada, no domínio de  $S$  (Equação 4.14).

$$P(s) = s^2 + \lambda_1 s + \lambda_2 \quad (4.14)$$

Com o erro dado por  $e_i = y_i - y_{iref}$ , deve satisfazer 4.15

$$\dot{e}_i + K_i \dot{e}_i + K_{ii} e_i = 0 \quad (4.15)$$

Uma forma de escolher adequadamente os parâmetros desejados para o controlador é igualar o polinômio característico  $P(s)$  a um polinômio desejado, com os lugares das raízes definidos. O polinômio desejado é dado por 4.16

$$P(S) = S^2 + 2\xi w_n S + w_n^2, \quad k_i = 2\xi w_n, \quad k_{ii} = w_n^2 \quad (4.16)$$

Onde,  $\xi$  e  $w_n$  são o sobre sinal e a frequência natural desejáveis. Observe que o sistema de controle é estável se  $k_i, k_{ii} > 0$  ( $\xi, w_n > 0$ ).

### Determinação do $P_{3aref}$ :

Deseja-se que a fonte principal seja o banco de célula a combustível conectado ao Boost isolado. Ela fornecerá a totalidade da energia e a fonte secundária, conectada aos boost em cascata, fornecerá a energia nos picos de potência. A fonte secundária será um banco de supercapacitores.

A potência de referência, que a fonte principal deve fornecer, terá que conseguir suprir a potência da carga e carregar o banco de super capacitores, se ele estiver descarregado, mas também ela deve permitir que a fonte secundária forneça energia quando o sistema estiver sobrecarregado. A potência de referência  $P_{3aref}$  é dado em função do erro da tensão no super-capacitor, como ilustrado na Figura 22.

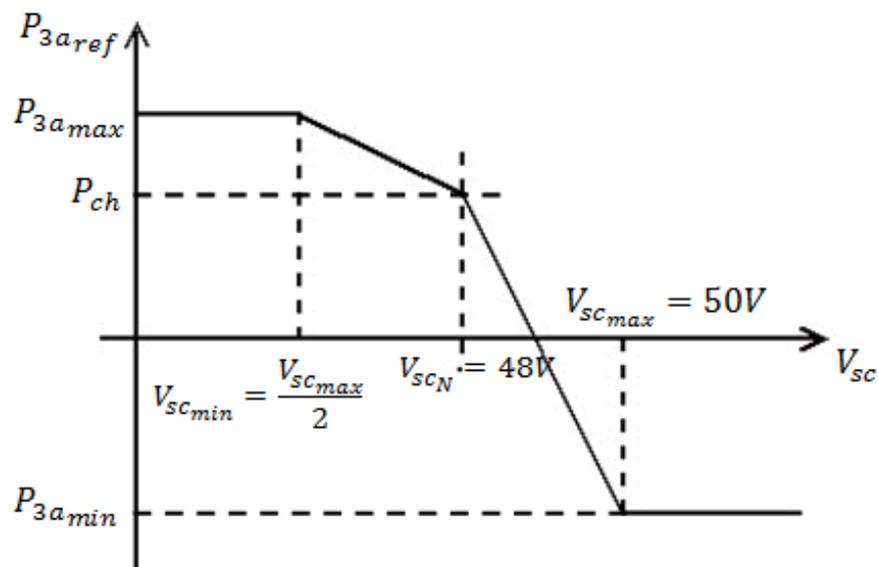


Figura 22: Determinação da potência de referência

### 4.1.3.2 Malha Interna: Controle da corrente de entrada

Neste trabalho utilizou-se um controlador não linear para a corrente *Sliding Mode Control* que trabalha com a idéia de superfície de escorregamento. O funcionamento para uma caso geral é dada pela equação 4.17. Onde  $S_{superficie}$  é a superfície de escorregamento escolhida.

$$S_{superficie} = (i - i_{ref}) + K \int (i - i_{ref}) dt \quad (4.17)$$

Para que a corrente convirja para sua referência é necessário que a derivada da superfície  $S_{superficie}$  siga a relação da equação 4.18

$$\dot{S}_{superficie} = -\lambda S_{superficie} \quad (4.18)$$

**Determinação dos parâmetros do controlador:** A superfície  $S_{superficie}$  escolhida é dada por (4.19). A determinação dos parâmetros ( $K$  e  $\lambda$ ) é imposta pela condição de convergência (4.18) e obtidos a partir da equação 4.20.

$$S_{superficie} = e + K \int edt \quad com \quad e = i - i_{ref} \quad (4.19)$$

$$\dot{S}_{superficie} = \dot{e} + Ke = -\lambda(e - K \int edt) \quad \Leftrightarrow \quad \dot{e} + (K + \lambda)e + \lambda K \int edt = 0 \quad (4.20)$$

Reescrevendo a equação 4.20 obtêm-se 4.21.

$$(\dot{i} - \dot{i}_{ref}) + (K + \lambda)(i - i_{ref}) + \lambda K \int (i - i_{ref}) dt = 0 \quad (4.21)$$

As constantes  $(K + \lambda)$  e  $\lambda K$  são os parâmetros do polinômio característico do controlador em malha fechada no domínio de  $S$  (Equação 4.22).

$$P(s) = s^2 + p_1s + p_2 \quad (4.22)$$

Como feito anteriormente para o controlador de correção de trajetória igualou-se o polinômio característico  $P(s)$  a um polinômio desejado, com os lugares das raízes definidos. O polinômio desejado é dado por 4.23

$$P(S) = S^2 + 2\xi w_i S + w_i^2, \quad (K + \lambda) = 2\xi w_i, \quad \lambda K = w_n^2 \quad (4.23)$$

Onde,  $\xi$  e  $w_n$  são o sobre sinal e a frequência natural desejáveis. Observe que o sistema de controle é estável se  $k_i, k_{ii} > 0$  ( $\xi, w_n > 0$ ). Os parâmetros do controlador de corrente são definidos pela equações 4.24.

$$\begin{cases} K + \lambda = 2\xi w_i \\ \lambda K = w_i^2 \end{cases} \quad (4.24)$$

Os parâmetros do controlador  $\lambda$  e  $K$  são fixos. Combinando as equações 4.17 e 4.18 com a equação da corrente de entrada de cada Boost, obtêm-se as diferentes relações cíclicas dos conversores.

$$d_1 = 1 + \frac{1}{V_m} \left[ L_1 \left( -\lambda_1 S_1 + \frac{di_1}{dt} - K_1(i_1 - i_{1ref}) \right) + r_{s1} i_1 - V_{sc} \right] \quad (4.25)$$

$$d_2 = 1 + \frac{1}{V_s} \left[ L_2 \left( -\lambda_2 S_2 + \frac{di_2}{dt} - K_2(i_2 - i_{2ref}) \right) + r_{s2} i_2 - V_m \right] \quad (4.26)$$

Para o Boost isolado, obtêm-se a relação  $d_3$  de forma similar de  $d_1$  e  $d_2$  com um termo de transformação  $N_3$ .

$$d_3 = 1 + \frac{N_3}{V_s} \left[ L_3 \left( -\lambda_3 S_3 + \frac{di_3}{dt} - K_3(i_3 - i_{3ref}) \right) + r_{s3} i_3 - V_{fc} \right] \quad (4.27)$$

## 4.2 CO-SIMULAÇÃO SABER-SIMULINK

A co-simulação entre os softwares saber e simulink permitem simular de maneira independente as duas partes do sistema. De um lado, o Saber é muito interessante para a simulação do circuito elétrico, de outro lado o simulink permite simular o sistema de controle (23).



Figura 23: Co-simulação Simulink-Saber

Essas duas partes trabalham de maneira independente em um intervalo de tempo  $\Delta t$

de transmissão de dados pré definidos (Step Size). O intervalo de tempo  $\Delta t$  corresponderá ao período de chaveamento do sinal de comando no Simulink. Para realizar a co-simulação é necessário configurar o Simulink como definido nas informações de ajuda do Saber.

É preciso instalar a *toolbox* do Saber no Simulink para inserir o bloco *SaberCosim* (24). Esse bloco receberá as variáveis que se desejam enviar do Simulink para o Saber e as variáveis que se desejam receber do Saber. Deve ser especificado o número correto de variáveis de entrada e saída.

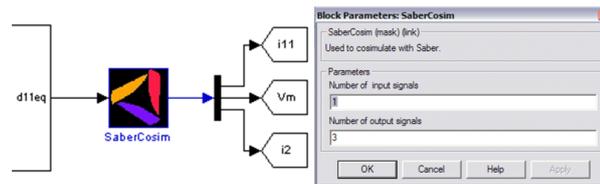


Figura 24: Bloco SaberCosim

Com a estrutura do circuito montada no Saber, chama-se o arquivo do Simulink clicando sobre a caixa de co-simulação que foi criada anteriormente, esse bloco apresentará o número de entradas e saída que foram definidas no Simulink. Por último, ajusta-se o intervalo de simulação (*Step-Size*) como ilustrada na Figura 25.

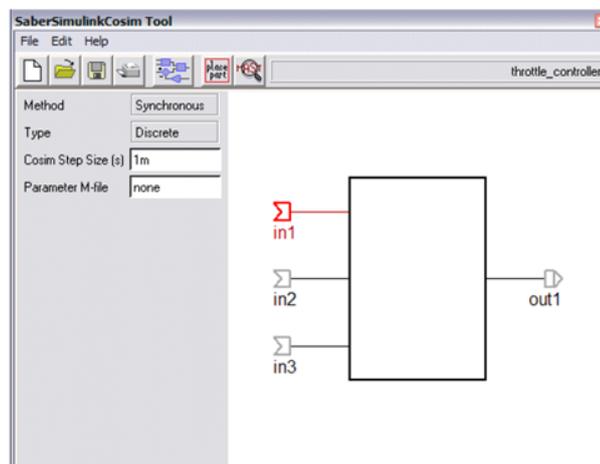


Figura 25: Configurando o Bloco SaberCosim

Interconectando a estrutura elétrica ao bloco de co-simulação o sistema estará pronto para o funcionamento, ver Figura 26.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos foram a partir de simulações. Estes foram obtidos com a co-simulação entre simulink-saber.

### 5.0.1 Controle de um Boost Independente

Após a construção do circuito do boost no Saber, foi realizado um teste para validar o controle por planificação. O esquema de montagem para um Boost pode ser observado na Figura 26 e o diagrama de controle na Figura 27.

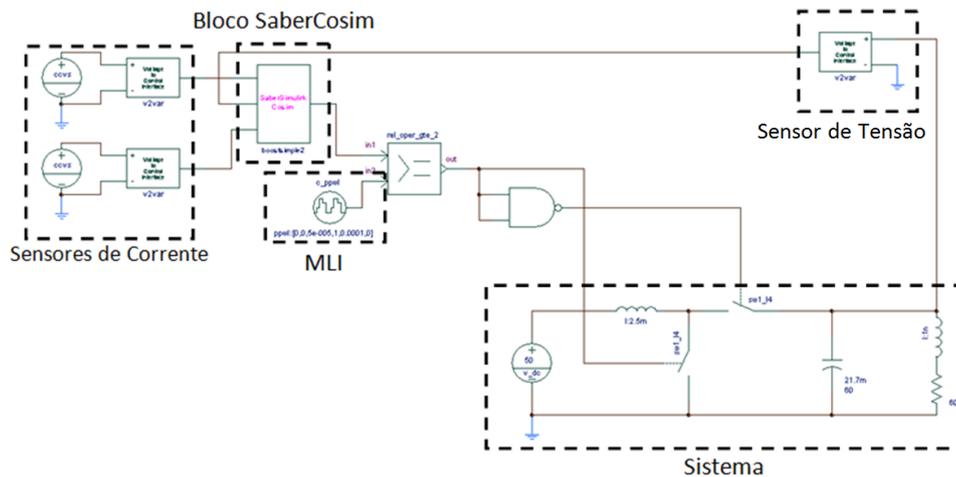


Figura 26: Circuito Boost simulado no Saber

O controlador de corrente Sliding Mode Control (equação 5.1) implementado no simulink pode ser visualizado na Figura 28

$$d_1 = 1 + \frac{1}{V_m} \left[ L_1 \left( -\lambda_1 S_1 + \frac{di_1}{dt} - K_1(i_1 - i_{1ref}) \right) + r_{s1} i_1 - V_{sc} \right] \quad (5.1)$$

O controlador de energia é definido pela equação 4.13 e o sistema de trajetória foi

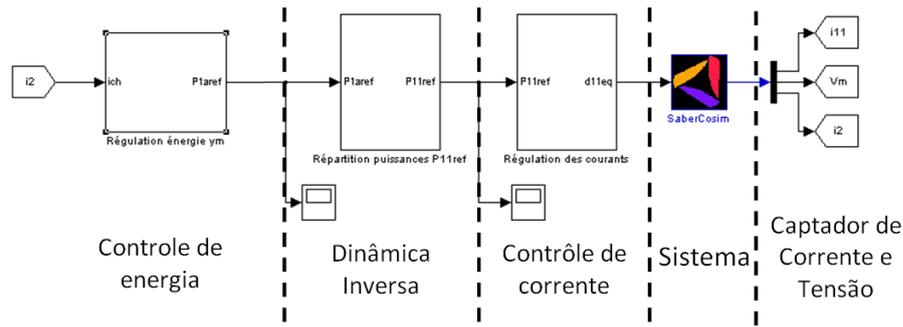


Figura 27: Sistema de controle Flatness para um Boost

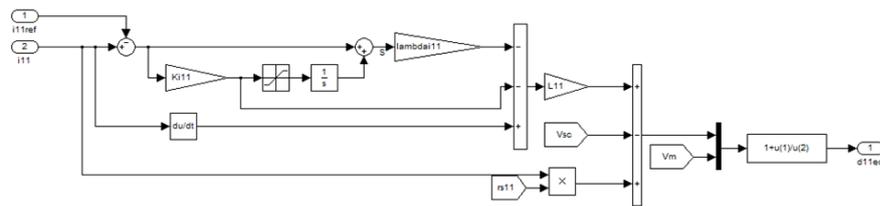


Figura 28: Controlador Sliding Mode

implementada no simulink, conforme a Figura 29. Foi utilizado uma filtro de segunda ordem para efetuar a planificação da trajetória com finalidade de suavizar a variação brusca da referência (Planifica-se o sinal de referência de maneira conhecida).

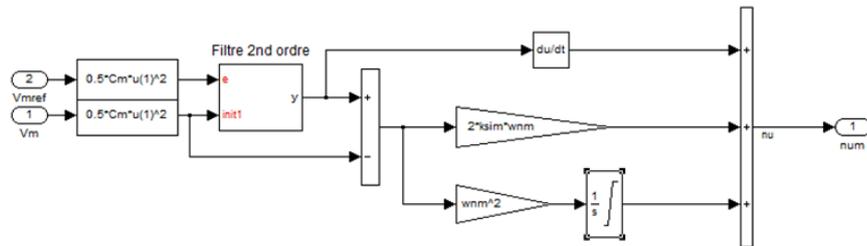


Figura 29: Controlador de energia

A dinâmica inversa do sistema é definida pela equação 5.2.

$$P_1 = 2P_{1a_{max}} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{P_{1aref}}{P_{1a_{max}}}} \right) \quad (5.2)$$

Com:

$$\begin{cases} P_{1a_{max}} = \frac{V_{sc}}{4r_s} \\ P_{1aref} = \dot{y} + \frac{V_m^2}{r_p} + P_{ch} \end{cases} \quad (5.3)$$

O diagrama de blocos implementado no simulink é apresentado na figura 30

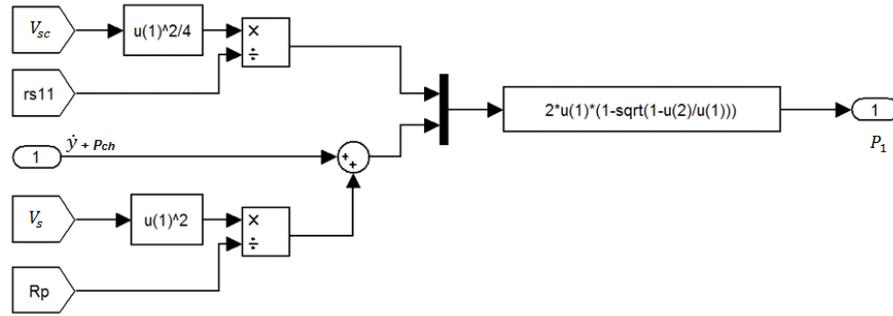


Figura 30: Dinâmica inversa

Algumas simulações foram efetuadas para diferentes trajetórias da tensão para uma entrada degrau em  $t = 0,8s$ . A tensão de entrada  $V_{sc} = 48$  e uma tensão de saída de  $100V$ . A tensão inicial do capacitor  $C_m$  foi fixada em  $65V$  para posteriormente ser elevada à  $100V$  pois não considera-se neste trabalho a etapa de inicialização do Boost e do sistema global que evidentemente exigirá um circuito adicional.

Torna-se necessário fixar as diferentes frequências de ressonâncias dos controladores, como definido pela equação 5.4

$$w_{pwm} \gg w_i \gg w_{nm} \gg w_{fn} \quad (5.4)$$

A frequência de chaveamento é de  $F_{pwm} = 20KHz$ . As constantes dos controladores são dadas a baixo.

$$\begin{cases} K_1 = \lambda_1 = 2000rad/s \\ \xi_m = 1 \\ w_{nm} = 250rad/s \end{cases} \quad (5.5)$$

Varia-se a frequência  $w_{fn}$  do filtro que impõem a trajetória, em  $50, 25$  e  $10 rad/s$  com  $\xi = 1$ . Os resultados obtidos estão presente nas figuras 31,33,35.

Pode-se observar, primeiramente, que quanto mais rápida a trajetória imposta, maior é a corrente demandada pelo Boost. Este parâmetro é levado em conta no dimensionamento. Em segundo, observa-se que em um degrau de carga o controlador de corrente responde rapidamente permitindo o controle da tensão e corretamente.

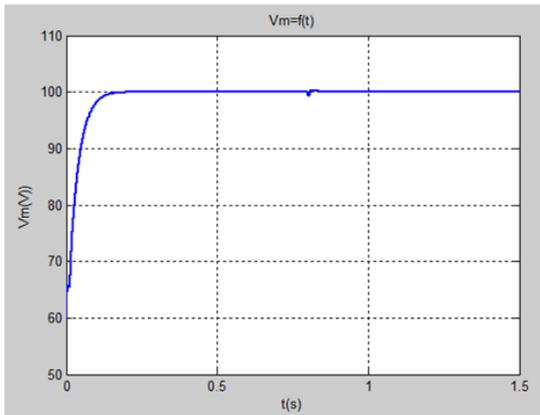


Figura 31: (a) Saída da tensão  $V_m$  do boost trajetória a 50rad/s  $\xi = 1$

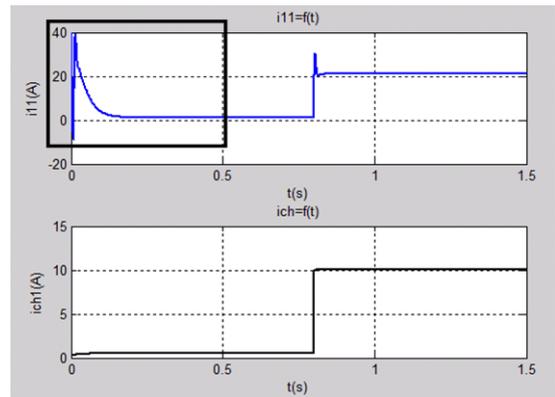


Figura 32: (b) Corrente de entrada do Boost

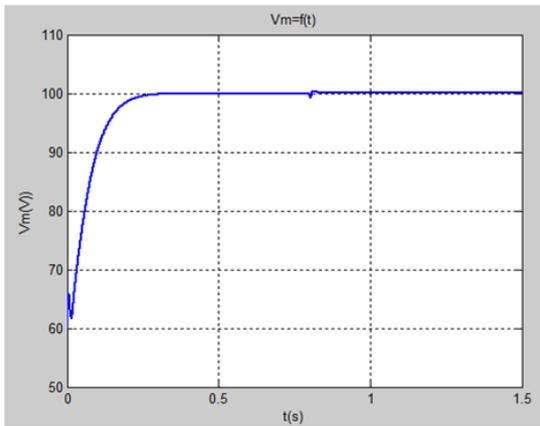


Figura 33: (a) Saída da tensão  $V_m$  do boost trajetória a 25rad/s  $\xi = 1$

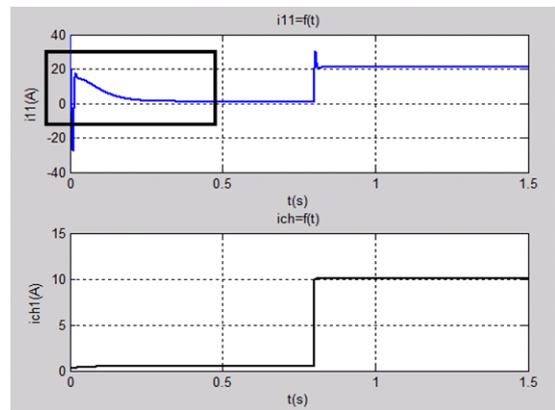


Figura 34: (b) Corrente de entrada do Boost

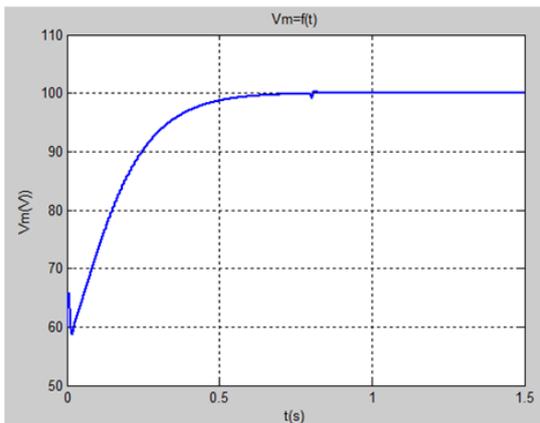


Figura 35: (a) Saída da tensão  $V_m$  do boost trajetória a 10rad/s  $\xi = 1$

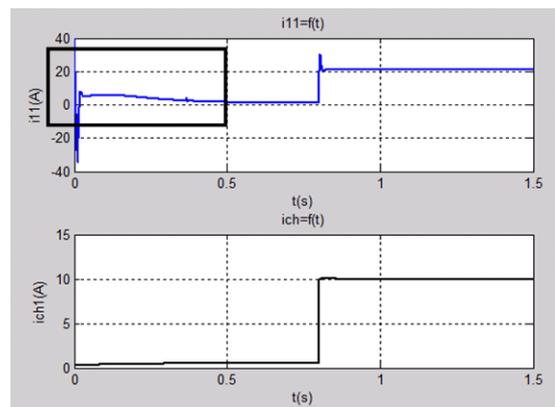


Figura 36: (b) Corrente de entrada do Boost

## 5.0.2 Controle dos dois Boost em Cascata

O diagrama de montagem para os Boost's em cascata feito no software Saber é apresentado na Figura 37.

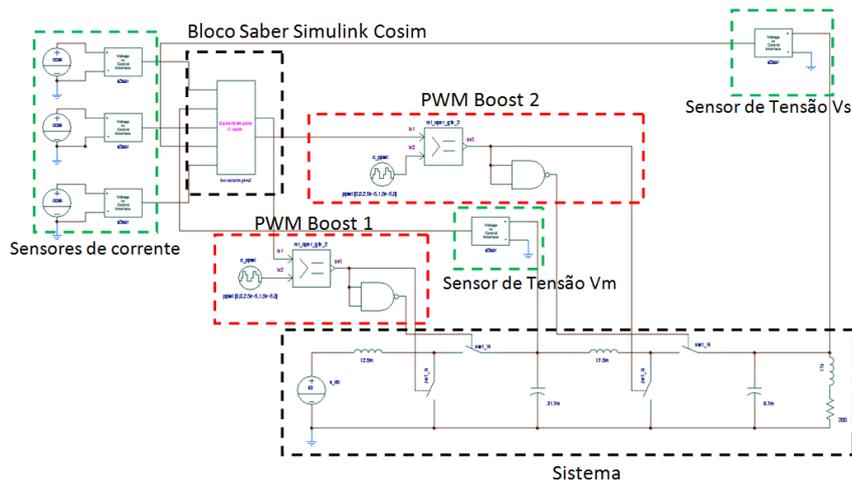


Figura 37: Sistema Boost em cascata

Na Figura 38 o sistema de controle flatness é apresentado em forma de blocos.

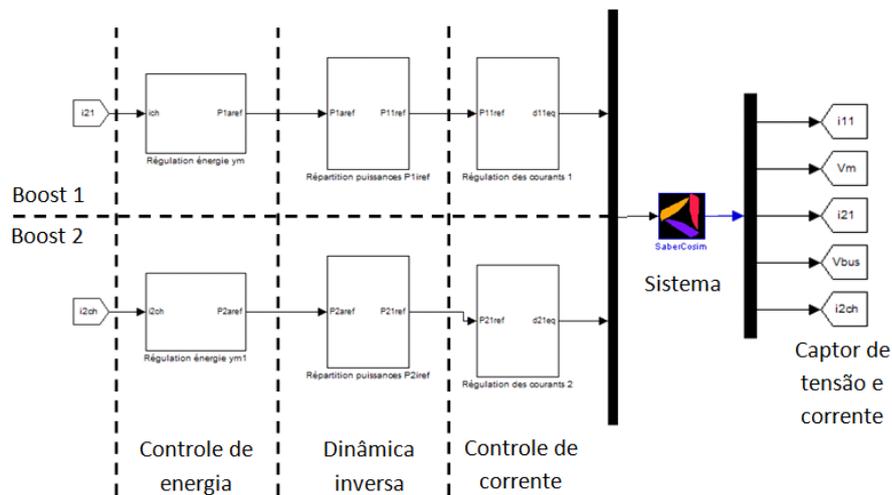


Figura 38: Sistema de controle do Boost em cascata

Os paramentos dos controladores são dados em (5.6).

$$\begin{cases} K_1 = \lambda_1 = K_2 = \lambda_2 = 2000rad/s \\ \xi_m = \xi_s = 1 \\ w_{nm} = 250rad/s \\ w_s = 100rad/s \end{cases} \quad (5.6)$$

A planificação das duas trajetórias, tensão intermediaria e tensão de saída é dado pelos parâmetros (5.7) e (5.8).

$$\begin{cases} w_{fm} = 25\text{rad/s} \\ \xi_{fm} = 1 \end{cases} \quad (5.7)$$

$$\begin{cases} w_{fs} = 10\text{rad/s} \\ \xi_{fm} = 1 \end{cases} \quad (5.8)$$

A simulação do funcionamento para o sistema boost em cascata é realizado com um degrau de carga para  $t = 1s$  (Figuras 39 e 40). Fixou-se a tensão de entrada em  $V_{sc} = 48V$  e efetuou-se uma mudança nas tensão intermediária para  $V_m = 100V$  e  $V_s = 400$  nos instantes de  $t = 0,2s$  e  $t = 0,5s$ , respectivamente.

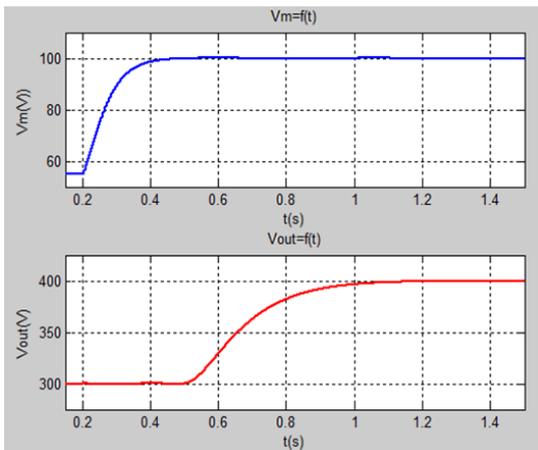


Figura 39: (a) Resposta de tensão do Boost em cascata

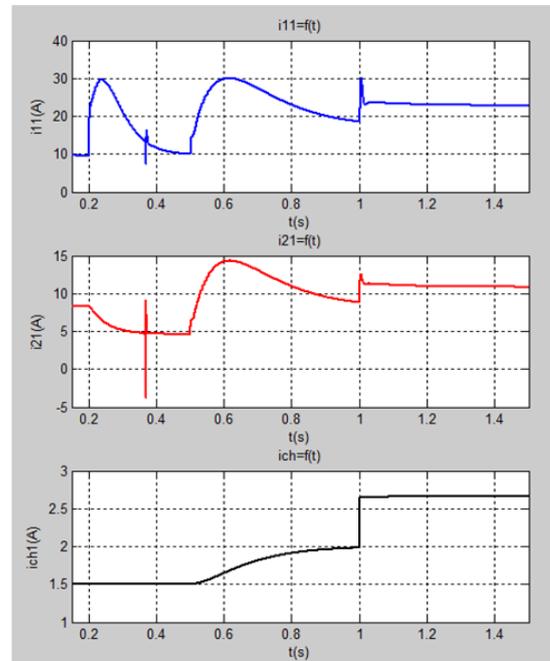


Figura 40: (b) Resposta da corrente do Boost em cascata

Pelas as análises das figuras 39 e 40 observa-se a boa regulação da tensão nos estantes  $t=0,2s$  e  $t=0,5s$  e no degrau de carga em  $t = 1,0s$ . A trajetória da energia armazenada nos capacitores  $C_m$  e  $C_s$  foram bem seguidas na dinâmica imposta, dinâmica essa que propicia baixos picos de correntes durante os transitórios e garante a durabilidade da eletrônica e das fontes embarcadas nos veículos elétricos. É importante observar que não é recomendado variar as duas tensões de referências no mesmo instante, pois isso levará a fortes picos de corrente nos terminais da fonte.

### 5.0.3 Controle do Boost Isolado

O diagrama de montagem para o Boost isolado feito no software Saber é apresentado na Figura 41.

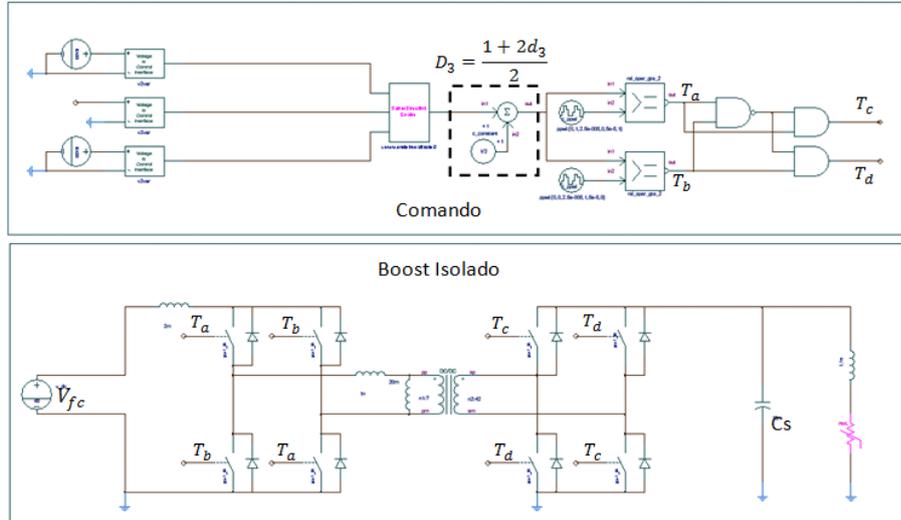


Figura 41: Sistema Boost isolado

Para o modelo do transformador mais próximo do real, acrescenta-se uma indutância de dispersão e uma indutância de magnetização. A relação de transformação do transformador é de  $N_3 = 6$ . A pseudo-relação cíclica  $d_3$  deverá estar entre 0 e 0,5 para qualquer estado de carga do super capacitor. A relação entre a tensão de entrada e saída do Boost isolado é dado pela equação 5.9

$$\frac{V_s}{V_{fc}} = N_3 \frac{1}{1 - d_3} \quad (5.9)$$

Ao nível do controlador de corrente utiliza-se a mesma relação do controlador do boost clássico acrescentado por um  $N_3$  (equação 5.10).

$$d_3 = 1 + \frac{N_3}{V_s} \left[ L_3 \left( -\lambda_3 S_3 + \frac{di_3}{dt} - K_3(i_3 - i_{3ref}) \right) + r_{s3}i_3 - V_{fc} \right] \quad (5.10)$$

Efetuuou-se uma simulação do funcionamento do conversor para um degrau de carga em  $t = 1s$  (Figura 42 e 48). A tensão de entrada foi fixada em  $V_{fc} = 48V$  e a tensão pedida na saída  $V_s = 400V$ .

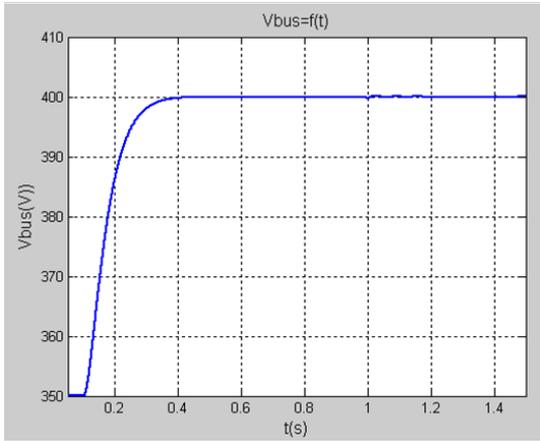


Figura 42: (a) Saída da tensão  $V_s$  do boost trajetória a  $60\text{rad/s}$   $\xi = 1$

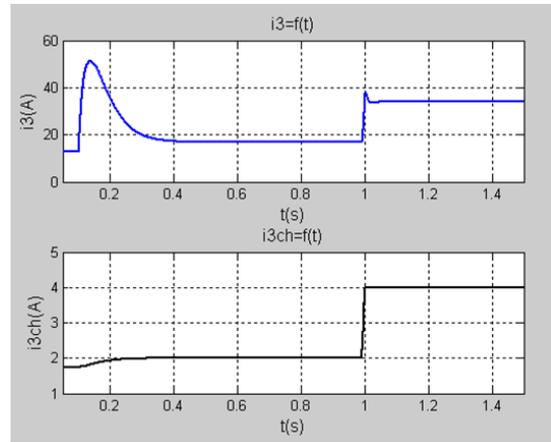


Figura 43: (b) Corrente de entrada do Boost Isolado

Observa-se que a tensão de saída foi bem controlada durante o degrau de carga e no degrau de referência de tensão em  $t = 0,1$ . Um pico elevado de corrente é observado durante o transitório da tensão de saída, essa amplitude pode ser reduzida associando uma segunda fonte auxiliar ao sistema. Um fonte auxiliar minimizaria os picos de corrente da fonte principal no regime transitório e garantiria a durabilidade da fonte de energia.

### 5.0.4 Controle da Estrutura Híbrida Completa com Fontes Ideais

A simulação da estrutura híbrida foi realizada com fontes de tensão ideais com a finalidade de validar a estratégia de controle adotada. As dinâmicas adotadas no controle consideram que a fonte principal possui uma resposta lenta na entrega de potência como baterias, célula a combustível ou grupo moto-gerador e que fonte secundária possui um resposta rápida como os super capacitores.

A Figura 44 apresenta o sistema híbrido proposto simulado no Saber com fontes idéas.

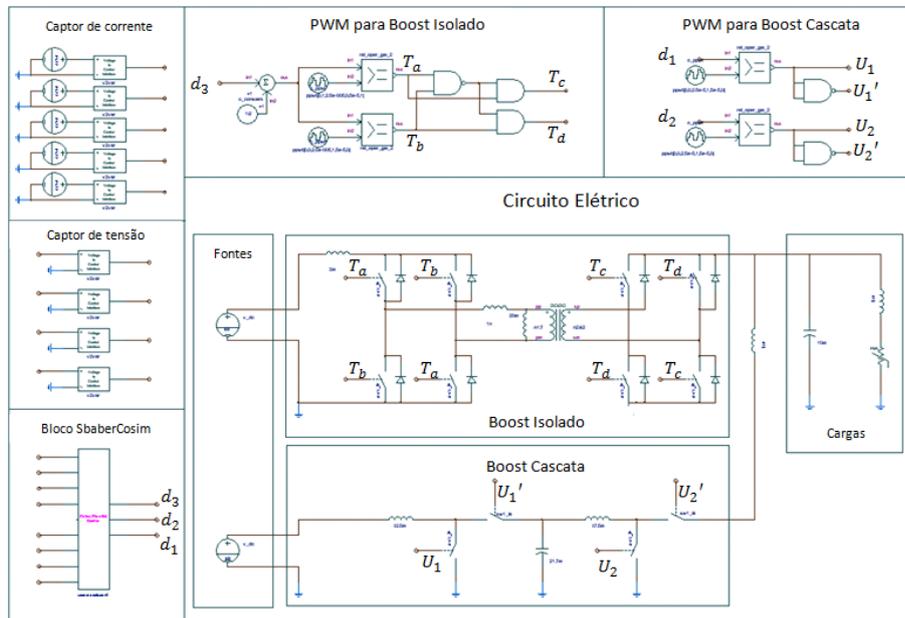


Figura 44: Sistema Híbrido simulado no Saber

A Figura 45 ilustra o sistema de controle da fonte híbrida proposta neste trabalho.

Nos primeiros ensaios o super capacitor não tinha sido levado em consideração no modelo do controle. Para a estrutura completa, a tensão do super capacitor fornece o modo de funcionamento da fonte (46). Em modo nominal de operação, a tensão do super capacitor é de  $V_{sc} = 48V$  que determina a potência de referência da fonte principal  $P_{3ref}$ .

Portanto para a definição do ponto de funcionamento  $P_{3a,ref} = P_{ch}$  simulou-se uma situação de funcionamento do conversor com um degrau de carga em  $t = 0,7s$  e  $t = 1,0s$  (Figuras 47 e 48).

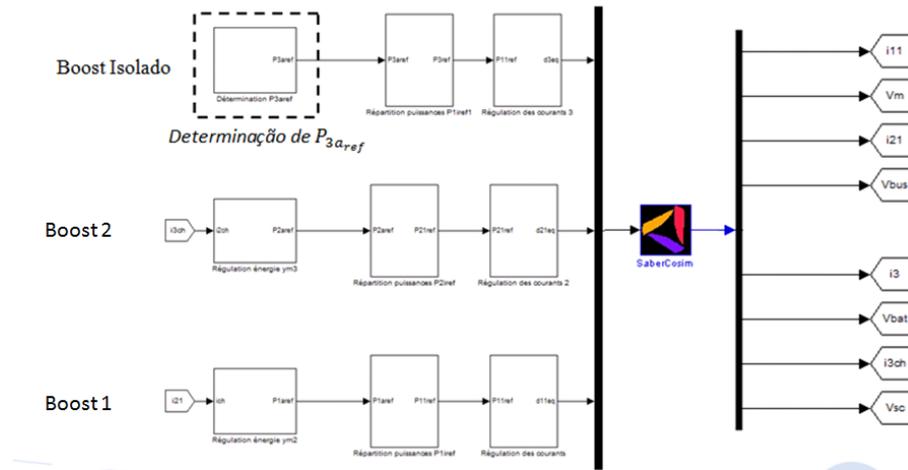


Figura 45: Sistema de controle da fonte híbrida

Observou-se que a tensão permaneceu em sua referência durante o transitório de carga. Notou-se também que a corrente  $i_3$  é uma imagem da corrente de carga  $i_{3ch}$  verificando a condição de funcionamento imposta  $P_{3a_{ref}} = P_{ch}$ . Os picos de corrente  $i_{11}$  e  $i_{21}$  ocorrem nos momentos de mudança de tensão nos barramentos CC. Essa característica reflete em uma ajuda oferecida, pela fonte secundária, a fonte primária.

No regime estacionário, determinado entre o degrau de carga, as correntes  $i_{11}$  e  $i_{21}$  se tornam negativas. Observou-se que foi dado uma potência mais elevada à carga em relação a exigida. Essa potência adicional é absorvida pelo super capacitor para garantir a regulação de tensão do barramento. O erro de referência na potência é devido a má estimativas das perdas na estrutura. Uma melhor eficiência na determinação da potência de referencia ocorreria com a utilização de um algoritmo que estimasse as perdas dos conversores por duas resistências série  $r_s$  e paralelo  $r_p$  não lineares, conforme [42].

Uma segunda simulação do sistema completo é ilustrada nas Figuras 49 e 50. Um degrau de carga nominal foi dado no instante  $t = 0,15s$  e nota-se as contribuições e as dinâmicas de potência entregue por cada fonte de energia. A potência do super capacitor foi saturada em  $5kW$ , a energia entregue pela fonte secundária, durante o transitório de carga, auxilia a regulação da tensão do barramento CC de saída, compensando assim a lenta dinâmica da fonte primária.

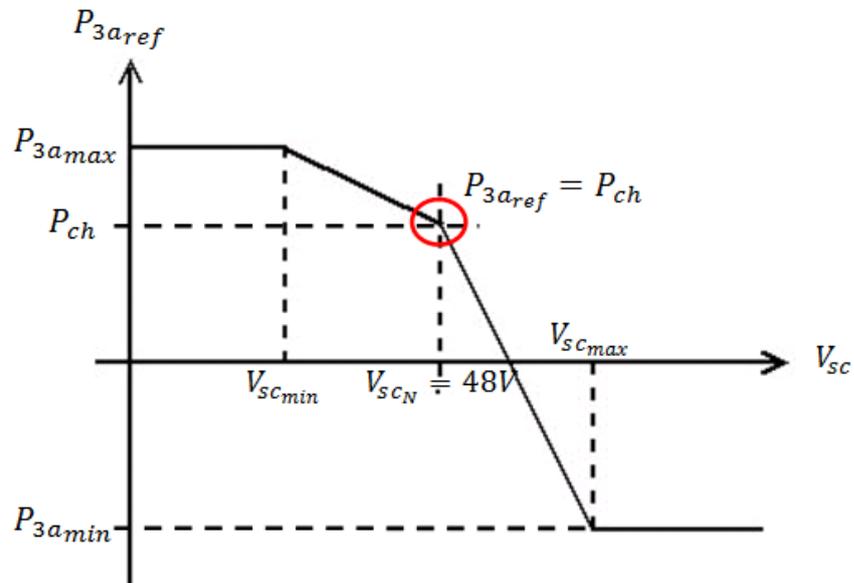


Figura 46: Determina a potência de referência da fonte principal

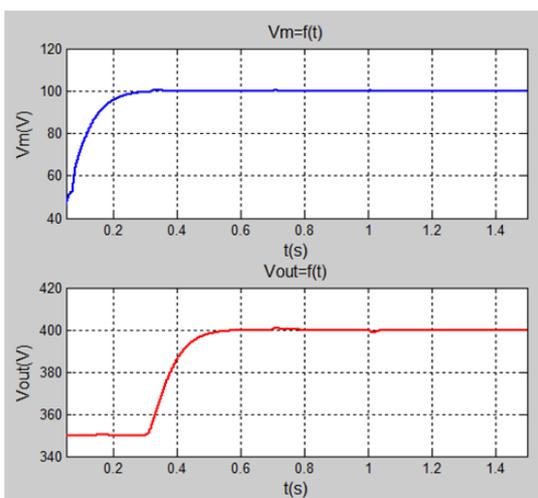


Figura 47: (a) Saída da tensão  $V_s$  da estrutura com trajetória a  $50\text{rad/s}$   $\xi = 1$

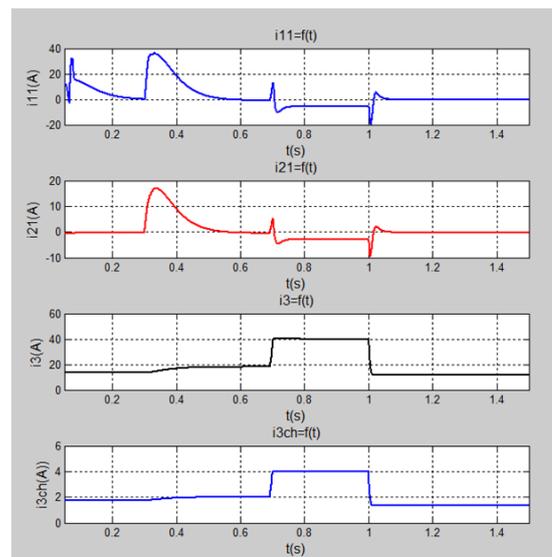


Figura 48: (b) Corrente de entrada da estrutura

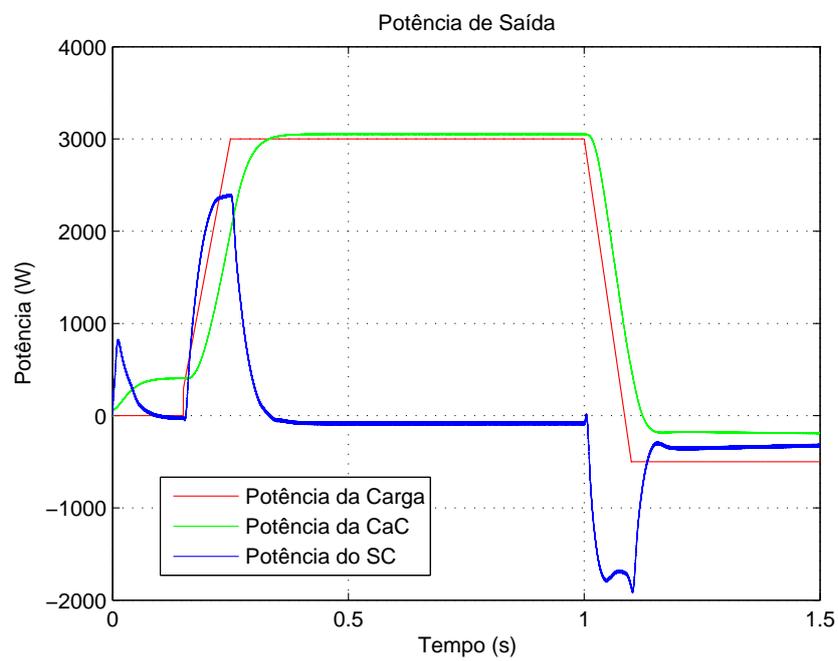


Figura 49: (a) Potências das fontes e de carga

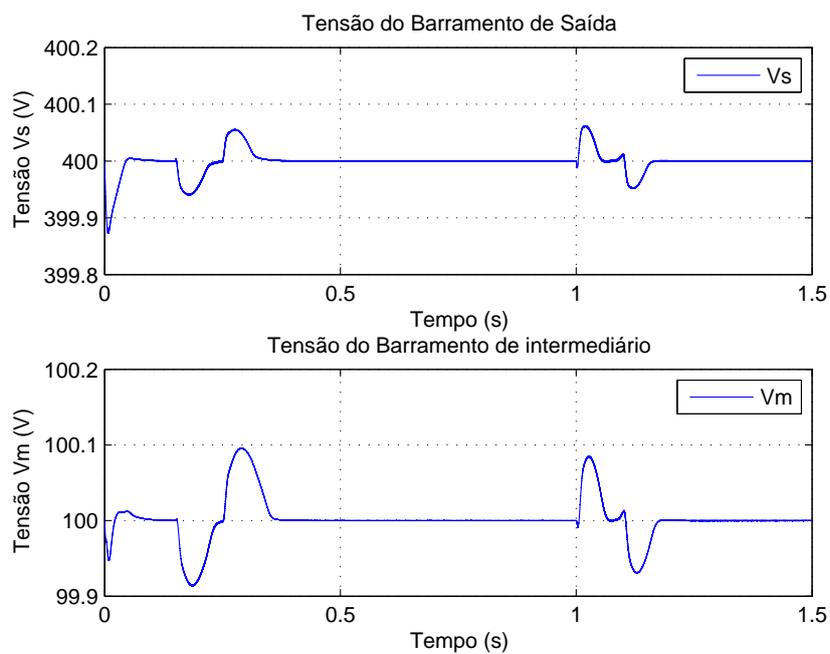


Figura 50: (b) Tensão dos barramentos CC

## 6 Conclusão

A utilização de duas ou mais fontes podem minimizar suas características indesejáveis associadas a cada uma. A associação das células a combustível e super capacitores nos veículo apresentou uma boa solução para os problemas de lenta dinâmica das CaC's e baixa potência específica dos super capacitores.

Os resultados simulados obtidos da fonte híbrida proposta com duas fontes de energia, que representaram a CaC e o SC, foram satisfatórios. A estratégia de controle utilizando o controlador flatness permitiu o planejamento das trajetórias das variáveis em questão e assim determinar a dinâmica apropriada para cada fonte. A estratégia adotada para a determinação da potência de referência possibilitou o funcionamento dos três modos de trabalho da fonte híbrida. A topologia utilizada para a fonte híbrida permitiu uma alta relação de transformação obtidas com os conversores estáticos, a forma de comando adotada para o conversor Boost Isolado facilitou a obtenção de seu modelo e de controle.

A má estimativa das perdas dos conversores não permitiu a correta determinação da potência referência  $P_{3aref}$ , resultados melhores podem ser obtidos com o algoritmo de estimativa de perdas proposto por Shahim [42]. O controlador *Flatness* permitiu a eliminação dos efeitos de cruzamento nas transições dos diferentes modos de funcionamento da fonte Híbrida.

### 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Os possíveis trabalhos a serem realizados para a melhoria dos resultados são:

- Implementação de um algoritmo de estimativas de perdas.
- Simulação com os modelos adequados para a CaC e o SC.
- Construção e desenvolvimentos dos testes práticos do sistema.

## *Referências*

- [1] LARMINIE, J. L. J. *Electric Vehicle Technology Explained*. [S.l.]: Ed. John Wiley, Sons, 2003.
- [2] THOUNTHONG S. RAEL, B. D. I. S. P. Utilizing fuel cell and supercapacitors for automotive hybrid electrical system. *IEEE, Applied Power Electronics Conference and Exposition*, v. 1, p. 90–96, Março 2005.
- [3] CO., H. M. Fcx fuel cell power. <http://world.honda.com/factbook/auto/fcx/200212/index.html>, 02 Dezembro 2002.
- [4] RODRIGUES, T. *TIARA RODRIGUES SMARSSARO SIMULAÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL EM MATLAB-SIMULINK*. [S.l.], Julho 2007.
- [5] AGENCY, I. E. *World Energy Outlook 2012*. [S.l.]: <http://www.worldenergyoutlook.org/publications>, 2012.
- [6] AMBIENTE, M. do meio. *Cidadania e Consumo Sustentável*. [S.l.]: <http://www.mma.gov.br/publicacoes/desenvolvimento-rural/category/74-ecoturismo>, 2013.
- [7] NOCE, T. *Estudo Do Funcionamento De Veículos Elétricos E Contribuições Ao Seu Aperfeiçoamento*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2009.
- [8] PAULO, C. M. D. S. *Estabelece a política municipal de incentivo ao uso de carros elétricos ou movidos a hidrogênio e dá outras providências*. [S.l.], 13 Junho 2012.
- [9] BNDES. Bndes destina 7,5 milhões de reais para inovação em motor elétrico de veículos. [www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes).
- [10] REIS, V. J.-P. *ESTRATÉGIA DE IMPLANTAÇÃO DO CARRO ELÉTRICO NO BRASIL*. [S.l.], 2010.
- [11] YING, G. H. W. Optimization of fuel cell and supercapacitor for fuel-cell electric vehicles. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, v. 55, p. 1748–1755, Novembro 2006.
- [12] WOUK, V. Hybrids: then and now. *Spectrum, IEEE*, v. 32, p. 16–21, 1995.
- [13] REVOREDO, T. C. *Modelagem e gerenciamento de potência de um veículo elétrico híbrido de célula a combustível*. Dissertação (Mestrado) — Ciência da Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

- [14] M.ZANDI A. PAYMAN, J.-P. M. S. B. D. Energy management of a fuel cell/supercapacitor/battery power source for electric vehicular applications. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, v. 60, p. 433–443, Fevereiro 2011.
- [15] PAYMAN S.PIERFEDERICI, F. M. A. Energy control of supercapacitor/fuel cell hybrid power source. *Energy Conversion and Management*, v. 49, p. 1637–1644, Junho 2008.
- [16] F.BELHACHEMI S.RAËL, B. A physical based model of power electric double-layer supercapacitors. In: *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 5, p. 3069–3076.
- [17] CHAARI O. BRIAT, J. D. J.-M. V. R. Performances regeneration of supercapacitors during accelerated ageing tests in power cycling. *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference*, p. 1–7, 30 Agosto 2011.
- [18] DESTRAZ P. BARRADE, A. R. B. Power assistance for diesel-electric locomotives with supercapacitive energy storage. *Power Electronics Specialists Conference*, v. 1, p. 677 – 682, Junho 2004.
- [19] THOUNTHONG, P. *Conception D Une Source Hybride Utilisant Une Pile A Combustible Et Des Supercondensateurs*. Tese (Doutorado) — INPL,Nancy, França, 2005.
- [20] PLANETSEED. Fontes alternativas de energia: Energia de célula combustível. <http://www.planetseed.com/pt-br/node/15895>, Janeiro 2013.
- [21] CORREA F.A. FARRET, L. C. M. S. J. An electrochemical-based fuel-cell model suitable for electrical engineering automation approach. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, v. 5, p. 1103–1112, Outubro 2004.
- [22] PAYMAN, A. *Contribution à la Gestion de l’Energie dans les Systèmes Hybrides Multi-sources Multi-charges*. Tese (Doutorado) — INPL,Nancy, França, 2009.
- [23] LARMINIE, A. D. J. *Fuel Cell Systems Explained*. [S.l.]: Ed. WILEY, 2003.
- [24] SADLI, I. *MODELISATION PAR IMPEDANCE D UNE PILE A COMBUSTIBLE PEM POUR UTILISATION EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE*. Tese (Doutorado) — INPL,Nancy, França, 07 Dezembro 2006.
- [25] ZANDI, M. *Contribution au pilotage des soucers hybrides d’energie electrique*. Tese (Doutorado) — INPL,Nancy, França, 2009.
- [26] JIN-YAN ZHANG LI, Z. J.-y. S. The study of electric field of high-power supercapacitors. *Electromagnetic Launch Technology, 2008 14th Symposium*, p. 1–5, 30 Junho 2008.
- [27] BONERT, L. Z. R. Measurement techniques for the evaluation of double-layer power capacitors. *IEEE Industry Applications Conference*, v. 2, p. 1097–1100, 5-9 Outubro 1997.

- [28] ZUBIETA, R. B. L. Characterization of double-layer capacitors (dlcs) for power electronics applications. *IEEE Industry Applications Conference*, v. 2, p. 1149–1154, 12-15 Outubro 1998.
- [29] THOUNTHONG S. RAEL, B. D. I. S. P. A control strategy of fuel cell/battery hybrid power source for electric vehicle applications. *Power Electronics Specialists Conference*, p. 1–7, Junho 2006.
- [30] AYAD S. PIERFEDERICI, S. R. B. D. M. Voltage regulated hybrid dc power source using supercapacitors as energy storage device. *Energy Conversion and Management*, 2007.
- [31] THOUNTHONG S. RAEL, B. D. P. Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for a distributed generation system. *IEEE Industrial Electronics*, v. 54, p. 3225 – 3233, Dezembro 2007.
- [32] THOUNTHONG S. PIERFEDERICI, B. D. P. Performance evaluation of differential flatness based-control of fuel cell/supercapacitor hybrid power source. *XIX International Conference on Electrical Machines*, 2010.
- [33] THOUNTHONG P. MUNGPORN, B. D. P. A nonlinear control approach to the energy management of solar power plant with supercapacitor for grid-independent applications. *Electrical Machines ICEM*, p. 1–6, Setembro 2010.
- [34] ZANDI M.; PAYMAN, A. M. J.-P. P. S. D. B. M.-T. F. Flatness based control of a hybrid power source with fuel cell supercapacitor battery. *Energy Conversion Congress and Exposition ECCE*, p. 1629 – 1634, Junho 2010.
- [35] SANTOS, G.; OLIVEIRA, A. C. F.; PIZZILOLO, H. P. T. Power flow management in hybrid power system using flatness based control. *Innovative Smart Grid Technologies IEEE ISGT*, p. 1–6, 2013.
- [36] NIEUWSTADT M. RATHINAM, R. M. M. van. Differential flatness and absolute equivalence. *Decision and Control*, v. 1, p. 326 – 332, 1994.
- [37] ZHANG, X. L. Q. Permanent magnetic synchronous motor and drives applied on a mid-size hybrid electric car. *Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE*, p. 1–5, 3-5 Setembro 2008.
- [38] FLIESS J. LEVINE, P. M. P. R. M. On differentially flat nonlinear system. *C.R. Acad. Sci Paris*, v. 315, p. 408–412, 1992.
- [39] M.ZANDI A. PAYMAN, J.-P. M. S. B. D. Flatness based control of a non-ideal dc/dc boost converter. *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2011.
- [40] MARTIN, P. *Systèmes plats: planification et sivre de trajectoires*. [S.l.], 1999.
- [41] SANTOS, G.; PEREIRA, H. Modelagem, simulação e construção de um conversor boost utilizado controle por planificação (flatness control). *Congresso Brasileiro de automatica CBA*, p. 1–7, 2012.
- [42] SHAHIN A. PAYMAN, J.-P. M. S. P. T. M. A. Approximate novel loss formulae estimation for optimization of power controller of dc/dc converter. *Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, p. 373 – 378, 7-10 Novembro 2010.