



GERENCIAMENTO DE POTÊNCIAS USANDO UM CONVERSOR MODULAR
EM CASCATA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS COM CÉLULAS A
COMBUSTÍVEL

Camila Barreto Fernandes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador(es): Luís Guilherme Barbosa Rolim
Francisco da Costa Lopes

Rio de Janeiro
Junho de 2017

GERENCIAMENTO DE POTÊNCIAS USANDO UM CONVERSOR
MODULAR EM CASCATA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS COM CÉLULAS A
COMBUSTÍVEL

Camila Barreto Fernandes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

Dr. Francisco da Costa Lopes, D. Sc.

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr.Ing.

Prof.^a Maria Dias Bellar, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2017

Fernandes, Camila Barreto

Gerenciamento de Potências Usando um Conversor Modular em Cascata para Veículos Elétricos com Células a Combustível/ Camila Barreto Fernandes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

X, 68 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador(es): Luís Guilherme Barbosa Rolim

Francisco da Costa Lopes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 57-64.

1. Veículos Elétricos. 2. Célula a Combustível. 3. Teoria pq. I. Rolim, Luís Guilherme Barbosa *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimento

Agradeço primeiramente aos meus pais que me guiaram e apoiaram ao longo dessa jornada e agradeço à Vida por todas as oportunidades que me fizeram chegar até aqui.

Agradeço aos amigos que me deram a força necessária para não desistir desse caminho árduo que é a pós-graduação. Agradeço em especial à Helena do Valle, Clarissa Eccard, Carol Conde e Tiago Nunes que seguiram comigo durante a graduação e até hoje estão comigo. Agradeço às minhas irmãs de coração Larry Victorino e Monique Barreto por sempre me acompanharem apesar da distância. Ao sempre amigo e companheiro de alma Ricardo Ramos. E aos novos amigos do CEFET Angra que estiveram ao meu lado e me apoiaram nos momentos finais.

Agradeço aos professores com quem tive o prazer de discutir e aprender diversos assuntos, em especial ao professor Guilherme Rolim que me orientou neste trabalho. Agradeço também ao Francisco Lopes, meu orientador externo, por me auxiliar em partes deste trabalho.

Agradeço por fim ao CNPq e ao CEPEL por financiarem minha pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

GERENCIAMENTO DE POTÊNCIAS USANDO UM CONVERSOR MODULAR
EM CASCATA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS COM CÉLULAS A
COMBUSTÍVEL

Camila Barreto Fernandes

Junho/2017

Orientadores: Luís Guilherme Barbosa Rolim

Francisco da Costa Lopes

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta uma proposta de gerenciamento de potências baseada na Teoria da Potência Ativa e Reativa Instantânea (Teoria-pq) para aplicação em veículos movidos a células a combustível e veículos elétricos em geral. Usando uma topologia de conversor modular em cascata, mais de uma fonte de potência pode ser combinada com capacitores para fornecer potência ativa e reativa de maneira eficiente para acionar o motor elétrico. A estratégia de controle para separar as potências ativa (valor médio e oscilante) e reativa, assim como a regulação da tensão nos capacitores, são descritas. São mostrados resultados de simulação, que foram realizados para validar a estratégia de controle sugerida, e resultados experimentais usando um protótipo de topologia mínima e uma carga estática.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

POWER MANAGEMENT USING A CASCADED MODULAR CONVERTER
APPLIED TO FUEL CELL VEHICLES

Camila Barreto Fernandes

June/2017

Advisors: Luís Guilherme Barbosa Rolim
Francisco da Costa Lopes

Department: Electrical Engineering

This work proposes a power management strategy based on pq-Theory for fuel cell and electric vehicle applications. Using a modular cascaded converter topology, more than one power source can be combined with capacitors to supply active and reactive power in an efficient manner to the electric motor. The control strategy to separate mean and oscillating active power and reactive power, as well as capacitors' voltage regulation control, are described. Simulation results are shown to validate the control strategy. Experimental results using a minimal topology prototype and static load show the practical application of the control.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	PANORAMA ATUAL DOS VEÍCULOS COM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL (<i>FUEL CELL</i>)	4
1.2.	MOTIVAÇÃO	6
1.3.	OBJETIVOS	8
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO	8
2.	ENGENHARIA DOS FCVs	9
2.1.	CÉLULA A COMBUSTÍVEL	11
2.2.	MOTORES ELÉTRICOS PARA TRACÇÃO	15
2.2.1.	MOTOR DE INDUÇÃO	16
2.2.2.	MOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃ PERMANENTE	17
2.2.3.	MOTOR DE RELUTÂNCIA CHAVEADA	18
2.3.	CONVERSORES DE POTÊNCIA	19
3.	METODOLOGIA	23
3.1.	VELOCIDADE E A REGIÃO DE ENFRAQUECIMENTO DE CAMPO	23
3.2.	TOPOLOGIA DO CONVERSOR DE POTÊNCIA	25
3.3.	ESTRATÉGIA DE CONTROLE	28
3.3.1.	SEPARAÇÃO DAS POTÊNCIAS REAL E IMAGINÁRIA	29
3.3.2.	CONTROLE DA TENSÃO NOS SUBMÓDULOS CAPACITIVOS	33
4.	SIMULAÇÕES E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	35
4.1.	SEPARAÇÃO DAS POTÊNCIAS	35
4.1.1.	SISTEMA MÍNIMO	36
4.1.2.	CARGA DOS CAPACITORES	37
4.1.3.	CORRENTES NO ESTATOR	38
4.1.4.	SINAIS DE MODULAÇÃO	39
4.2.	COMPORTAMENTO DINÂMICO DO EMPILHAMENTO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL ...	40
4.2.1.	POTENCIAL DE NERNST	40
4.2.2.	SOBREPOTENCIAL DE ATIVAÇÃO	41

4.2.3.	SOBREPOTENCIAL ÔHMICO (OU PERDAS ÔHMICAS)	42
4.2.4.	SOBREPOTENCIAL DE CONCENTRAÇÃO	42
4.2.5.	REPRESENTAÇÃO ELÉTRICA DOS EFEITOS TÉRMICOS	43
4.2.6.	CURVAS DE POLARIZAÇÃO E TEMPERATURA.....	43
4.3.	CONTROLE DE CORRENTE COM CAC	44
4.4.	CONTROLE DO MOTOR DE INDUÇÃO.....	47
4.5.	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	51
5.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
	APÊNDICE – CURVAS DE POLARIZAÇÃO E EFICIÊNCIA DE UM EMPILHAMENTO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL REAL	65

Lista de Figuras

FIGURA 1.1: BMW HYDROGEN 7. FONTE [3].-----	3
FIGURA 1.2: ELETROVAN GENERAL MOTORS. FONTE: [6].-----	4
FIGURA 1.3: TOYOTA MIRAI. FONTE [9].-----	5
FIGURA 1.4: HONDA CLARITY FUEL CELL. FONTE [8].-----	5
FIGURA 1.5: HYUNDAI IX35 FUEL CELL. FONTE [10].-----	5
FIGURA 1.6: DIAGRAMA SIMPLIFICADO DA ESTRUTURA PROPOSTA.-----	8
FIGURA 2.1: ARQUITETURA BÁSICA DE UM FCV.-----	9
FIGURA 2.2: TOYOTA MIRAI. ADAPTADA DE [32].-----	10
FIGURA 2.3: CÉLULA À COMBUSTÍVEL. FONTE [35].-----	12
FIGURA 2.4: CURVA DE POLARIZAÇÃO DE UMA CAC.-----	14
FIGURA 2.5: VISTA EM CORTE DOS MOTORES. DA ESQUERDA PARA A DIREITA: INDUÇÃO, SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES E RELUTÂNCIA CHAVEADA [40].-----	15
FIGURA 2.6: CARACTERÍSTICAS DE TORQUE E POTÊNCIA IDEAIS.-----	16
FIGURA 2.7: ESQUEMA TÍPICO DE UM ÔNIBUS MOVIDO A HIDROGÊNIO. ADAPTADA DE [50].-----	19
FIGURA 2.8: CONVERSOR PARA FCV: (A) TENSÃO CC VARIÁVEL E (B) TENSÃO CC FIXA. FONTE [51]-----	20
FIGURA 2.9: CONVERSOR DE MÚLTIPLAS ENTRADAS. FONTE [52].-----	21
FIGURA 2.10: TOPOLOGIA PROPOSTA POR NEUBURGUER. FONTE [53].-----	21
FIGURA 2.11: DUPLO CONVERSOR. FONTE [54].-----	22
FIGURA 2.12: CONEXÕES DE MÚLTIPLOS EMPILHAMENTOS DE CACs: (A) SÉRIE, (B) PARALELO, (C) CASCATA E (D) SÉRIE-PARALELO. FONTE [55].-----	22
FIGURA 3.1: MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO EM REGIME PERMANENTE.-----	24
FIGURA 3.2: DIAGRAMA FASORIAL DE UM MOTOR DE INDUÇÃO EM REGIME PERMANENTE PARA VELOCIDADE BASE E VELOCIDADE ACIMA DA VELOCIDADE BASE.-----	25
FIGURA 3.3: TOPOLOGIA DE DUPLO CONVERSOR. FONTE [62].-----	26
FIGURA 3.4: INVERSOR BOOST MULTINÍVEL COM PONTE H EM CASCATA SEM INDUTOR. FONTE [63].-----	27
FIGURA 3.5: TOPOLOGIA MÍNIMA DO CONVERSOR PROPOSTO.-----	27
FIGURA 3.6: CIRCUITOS MEIA PONTE DOS SUBMÓDULOS POR FASE.-----	28
FIGURA 3.7: DIAGRAMA DE CONTROLE.-----	29
FIGURA 3.8: EIXOS REFERENCIAIS DQ E PQ.-----	30
FIGURA 3.9: EIXOS DE REFERÊNCIA DQ, $\alpha\beta$ E PQ.-----	30
FIGURA 3.10: DIAGRAMA DE CONTROLE DOS CAPACITORES.-----	33
FIGURA 3.11: VETOR UNITÁRIO PARA CONTROLE DA TENSÃO NOS CAPACITORES.-----	33
FIGURA 4.1: REPRESENTAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO NO PSIM.-----	35
FIGURA 4.2: TOPOLOGIA DO SISTEMA MÍNIMO SIMULADO.-----	36
FIGURA 4.3: SUBCIRCUITO COM MEIA PONTE ALIMENTADA POR UMA FONTE IDEAL.-----	37
FIGURA 4.4: SUBCIRCUITO COM MEIA PONTE ALIMENTADA POR UM CAPACITOR.-----	37

FIGURA 4.5: CARGA E CONTROLE DA TENSÃO NOS CAPACITORES. -----	38
FIGURA 4.6: TRANSITÓRIO DA CORRENTE DO ESTATOR. -----	38
FIGURA 4.7: CORRENTES NO ESTATOR NA SEPARAÇÃO DAS POTÊNCIAS. -----	39
FIGURA 4.8: SINAIS DE MODULAÇÃO. -----	39
FIGURA 4.9 MODELO DE SIMULAÇÃO DO EMPILHAMENTO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL: (A) BLOCO DE PROGRAMAÇÃO C, (B) FONTE DE TENSÃO CONTROLADA E (C) CIRCUITO EQUIVALENTE DOS EFEITOS TÉRMICOS. -----	40
FIGURA 4.10: REPRESENTAÇÃO DO POTENCIAL DE NERNST NA FORMA DE CIRCUITO SEGUNDO [72]. -----	41
FIGURA 4.11: CIRCUITO EQUIVALENTE DOS EFEITOS TÉRMICOS. -----	43
FIGURA 4.12: CURVA DE POLARIZAÇÃO OBTIDA VIA SIMULAÇÃO. -----	43
FIGURA 4.13: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CAC OBTIDA VIA SIMULAÇÃO. -----	44
FIGURA 4.14: CIRCUITO PARA CONTROLE DE CORRENTE COM A CAC. -----	44
FIGURA 4.15: CORRENTES NO MOTOR COM SEPARAÇÃO DE POTÊNCIAS E CAC. -----	45
FIGURA 4.16: SINAIS DE MODULAÇÃO INCLUINDO O CIRCUITO EQUIVALENTE DA CAC. -----	46
FIGURA 4.17: CORRENTE FORNECIDA PELO EMPILHAMENTO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL. -----	46
FIGURA 4.18: TENSÃO NOS TERMINAIS DO EMPILHAMENTO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL. -----	46
FIGURA 4.19: POTÊNCIAS DEMANDADA PELO MOTOR E FORNECIDA PELAS BATERIAS E EMPILHAMENTO DE CACS. -----	47
FIGURA 4.20: CIRCUITO REDUZIDO PARA CONTROLE DE VELOCIDADE. -----	47
FIGURA 4.21: <i>ENCODER</i> APLICADO A CARGA PARA MEDIÇÃO DE POSIÇÃO E VELOCIDADE. -----	48
FIGURA 4.22: VELOCIDADE DO MOTOR. -----	48
FIGURA 4.23: TORQUE PRODUZIDO. -----	48
FIGURA 4.24: TENSÃO NO CAPACITOR DO SUBMÓDULO CAPACITIVO DA FASE E SEU SINAL DE MODULAÇÃO. -----	49
FIGURA 4.25: MODULADORAS DO SUBMÓDULO CAPACITIVO. -----	49
FIGURA 4.26: COMPONENTES i_d E i_q DAS CORRENTES DO MOTOR. -----	50
FIGURA 4.27: VARIAÇÃO DE VELOCIDADE. -----	50
FIGURA 4.28: PERFIL DE TORQUE PARA A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE. -----	51
FIGURA 4.29: PERFIL DA CORRENTE COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE. -----	51
FIGURA 4.30: PROTÓTIPO PARA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL. -----	52
FIGURA 4.31: PRÉ CARGA E CONTROLE DE TENSÃO NOS CAPACITORES. -----	52
FIGURA 4.32: CONTROLE DE TENSÃO NOS CAPACITORES E CONTROLE DA CORRENTE DO CONVERSOR. -----	53
FIGURA 4.33: DEGRAU DE CORRENTE. -----	53
FIGURA 4.34: SEPARAÇÃO DAS POTÊNCIAS REAL E IMAGINÁRIA. -----	54
FIGURA A.1: PERFIS DA TENSÃO E DA CORRENTE MEDIDAS. -----	65
FIGURA A.2: CURVA DE POLARIZAÇÃO DO EMPILHAMENTO. -----	66
FIGURA A.3: VAZÃO DE H_2 MEDIDA. -----	66
FIGURA A.4: AJUSTE DE CURVA DO PICO DA VAZÃO DE HIDROGÊNIO. -----	67
FIGURA A.5: EFICIÊNCIA E POTÊNCIA ELÉTRICA. -----	68

1. INTRODUÇÃO

O transporte de passageiros e cargas, seja terrestre, aéreo ou marítimo, é hoje o responsável por grande parte da energia consumida mundialmente. A maior parte desta energia é proveniente dos derivados do petróleo, usado diretamente como combustível de um veículo ou na produção de outras formas de energia, como elétrica, que alimentam um sistema. Em médio e longo prazo, devido ao aumento crescente da demanda por energia, a utilização deste tipo de recurso não renovável pode vir a se tornar um problema, já que ocorre uma diminuição das reservas naturais e conseqüentemente o aumento de seu custo [1].

A queima de combustíveis fósseis pelos veículos com motor de combustão interna (MCI) também tem grande impacto na poluição atmosférica, principalmente em grandes cidades onde há concentração da população e de veículos de transporte de passageiros, sejam eles individuais, como os veículos de passeio e táxis, ou coletivos, como ônibus e BRTs.

Num esforço para mitigar os problemas causados pela utilização de combustíveis fósseis, diversos estudos têm apresentado alternativas visando à combinação entre estes e combustíveis menos poluentes ou mesmo a sua completa substituição. Motores do tipo *flex* que misturam gasolina e etanol ou diesel e biodiesel são exemplos de implementação destes esforços.

Os veículos híbridos, que já possuem um mercado consolidado na Europa e EUA, começam a avançar em países como o Brasil e outros países em desenvolvimento. Esses veículos agregam o benefício da tração elétrica com a combustão interna e conseguem de maneira eficiente diminuir os efeitos poluentes da queima de combustíveis fósseis.

Já os veículos chamados puramente elétricos são tracionados apenas por motores elétricos, que são alimentados por dispositivos armazenadores de energia como um banco de baterias ou supercapacitores, que, por sua vez, necessitam ser carregados através de uma fonte de energia externa periodicamente.

Os veículos movidos a hidrogênio podem ser de combustão interna, onde a energia térmica do hidrogênio é convertida em energia cinética através de etapas intermediárias envolvendo a queima direta do hidrogênio, ou podem ser veículos elétricos que utilizam células a combustível (CaCs) para gerar energia elétrica a partir

de reações eletroquímicas envolvendo hidrogênio e oxigênio. Em ambos os casos o produto final da reação principal é o vapor de água, fazendo desta uma opção localmente não poluente.

A Tabela 1-1 classifica e resume as características de cada tipo de veículo elétrico.

Tabela 1-1: Classificação e características dos veículos elétricos. Adaptada de [2].

Tipo de Veículo Elétrico	Híbrido (HEV)	Baterias (BEV)	Célula a Combustível (FCV)
Propulsão	Motor elétrico Motor a combustão interna	Motor elétrico	Motor elétrico
Sistema de Energia	Bateria Ultracapacitor Unidade de geração do motor a combustão interna	Bateria Ultracapacitor	Células a combustível Bateria Ultracapacitor
Fonte de Energia	Gasolina	Rede elétrica	Hidrogênio
Características	Baixa emissão Alta economia de combustível Alta autonomia Dependente do petróleo Alto custo em comparação aos veículos a combustão interna.	Zero emissão Alta eficiência energética Independente de petróleo Autonomia relativamente curta Alto custo inicial	Zero emissão Alta eficiência de energética Independente de petróleo Autonomia razoável Alto custo
Maiores Problemas	Controle, otimização e gerenciamento de diversas fontes Tamanho e gerenciamento das baterias	Gerenciamento das baterias Postos de recarga Custo	Custo, ciclo de vida e confiabilidade das células a combustível Infraestrutura do hidrogênio

Entre 2005 e 2007 foram produzidas 100 unidades do BMW Hydrogen 7, Figura 1.1, um veículo que utiliza hidrogênio como combustível num processo de combustão junto à gasolina. Como o veículo não apresentou a eficiência desejada, a montadora finalizou a produção e atualmente une esforços com a Toyota na intenção de melhorar os veículos que usam células a combustível para a produção de energia elétrica [3].



Figura 1.1: BMW Hydrogen 7. Fonte [3].

Para que os veículos elétricos sejam considerados “limpos” ou não poluentes, a produção da energia que os abastece deve partir de fontes renováveis como a hídrica, solar, eólica, etc. O mesmo vale para a produção do hidrogênio nos veículos movidos a células a combustível, que pode ser obtido através de processo de eletrólise da água utilizando fontes consideradas limpas, como a energia solar, eólica, etc. ou pela reforma do etanol [4]. De fato, com o hidrogênio sendo produzido a partir da cana de açúcar ou milho, fecha-se um ciclo de CO₂ que torna o processo como um todo mais eficiente e limpo.

Autores de estudos no âmbito dos carros puramente elétricos e movidos a hidrogênio costumam citar o alto custo dos sistemas no mercado e a menor autonomia em relação aos veículos a combustão interna como limitadores. Em geral, os dispositivos para armazenamento de energia utilizados em ambas as configurações (baterias e super/ultracapacitores) e para o armazenamento do hidrogênio ainda precisam evoluir para que esses veículos se tornem competitivos no mercado. O mesmo vale para as células a combustível. Porém, aqueles que apostam nessas tecnologias, ressaltam seus benefícios em relação ao meio ambiente para um futuro não muito distante [5].

Outro ponto que ainda é uma limitação para difundir o uso de ambos os tipos de veículos elétricos é a infraestrutura necessária para o abastecimento (no caso dos veículos alimentados a hidrogênio) ou postos de recarga (no caso dos veículos puramente elétricos). Os veículos movidos a hidrogênio levam vantagem em relação ao tempo de recarga, que já é similar ao dos veículos a combustão interna. Porém existem bem mais estações de recarga de veículos elétricos instaladas, devido à demanda que já é significativa.

1.1. PANORAMA ATUAL DOS VEÍCULOS COM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL (FUEL CELL)

Os primeiros veículos movidos a hidrogênio utilizando células a combustível datam da década de 1960. A General Motors desenvolveu uma Eletrovan para 6 passageiros, mostrada na Figura 1.2, que foi utilizada apenas na companhia por razões de segurança [2].



Figura 1.2: Eletrovan General Motors. Fonte: [6].

Atualmente o mercado é bastante dividido em relação aos veículos movidos a hidrogênio. Montadoras como a Tesla Motors, Volvo e Nissan refutam a ideia e apostam somente nos veículos puramente elétricos e na infraestrutura associada para recarga rápida.

As japonesas Toyota e Honda já lideram o mercado com os modelos Mirai, mostrado na Figura 1.3, e Clarity Fuel Cell, mostrado na Figura 1.4, que foram lançados no salão de Tóquio de 2015. A Hyundai também já comercializa seu modelo ix35 Fuel Cell, mostrado na Figura 1.5. A BMW e General Motors também estão na corrida pelo mercado e uniram esforços com Toyota e Honda, respectivamente, para desenvolverem suas tecnologias no segmento [7],[8].



Figura 1.3: Toyota Mirai. Fonte [9].



Figura 1.4: Honda Clarity Fuel Cell. Fonte [8].



Figura 1.5: Hyundai ix35 Fuel Cell. Fonte [10].

Os veículos baseados em células a combustível ou FCVs (da sigla em inglês para *fuel cell vehicles*) em geral possuem uma arquitetura similar a de um veículo híbrido série, onde a energia produzida pelo empilhamento¹ de células a combustível é utilizada na propulsão do motor elétrico e parte dela é armazenada em um banco de baterias.

¹ Um empilhamento de células a combustível é a ligação elétrica em série de diversas CaCs unitárias para alcançar uma determinada tensão.

Existem duas diferenças básicas entre uma célula a combustível e uma bateria: a bateria é um dispositivo de armazenamento de energia, enquanto a CaC é um gerador que combina oxigênio e hidrogênio para produzir eletricidade; baterias são recarregáveis e independentes e CaCs (ou empilhamentos de CaCs) são sistemas complexos que incluem o empilhamento em si, trocadores de calor, compressores e etc.

O desempenho na partida de um veículo alimentado por um empilhamento de CaCs pode ser pior que o de um veículo convencional devido à dinâmica associada aos processos eletroquímicos e termodinâmicos que ocorrem nas CaCs para a geração de energia. Por esta razão, deve ser associado ao empilhamento de CaCs um elemento armazenador de energia que auxilie na aceleração. Este sistema deve ser dimensionado de forma a fornecer os picos de potência necessários na aceleração do veículo e para que este seja capaz de responder às solicitações de diferentes regimes de uso (*drive cycles*).

Os motores elétricos utilizados nos FCVs são os mesmos dos veículos híbridos ou elétricos. O mais utilizado atualmente é o motor síncrono de ímãs permanentes por sua alta densidade de potência, que é uma vantagem em relação ao peso e espaço ocupado. Porém, com o aumento do custo dos materiais magnéticos utilizados em sua composição, muito se tem estudado a respeito dos motores de indução, que são amplamente utilizados na indústria, e dos motores de relutância.

Outro foco de estudos dos veículos elétricos acontece na configuração dos conversores de potência que são utilizados para acionar o motor elétrico e alimentar as diversas cargas auxiliares. A escolha correta do tipo de conversor a ser utilizado nestes veículos melhora a performance e economia de combustível e ainda diminui o peso e o tamanho do veículo. As topologias de conversores aplicados aos veículos com CaCs devem ser capazes de acoplar e gerenciar as diversas fontes de energia.

1.2. MOTIVAÇÃO

Uma pesquisa simples ao noticiário nacional e internacional mostra como os veículos movidos a hidrogênio têm se tornado uma realidade. Um esforço conjunto entre diversas companhias que atuam no segmento tem sido feito para ampliar o mercado e diminuir o custo dos veículos e de toda a infraestrutura envolvida [11].

No salão de Tóquio de 2015 os destaques foram os carros de passeio com células a combustível das montadoras japonesas Toyota e Honda [12]. O Mirai já é comercializado no Japão e Califórnia (EUA) e começa a ganhar espaço na Europa [13].

O Clarity começou a ser vendido no Japão em 2016 e também já está ganhando mercado [14]. Os modelos da Hyundai também são notícia [15]. É possível encontrar inclusive quadros comparativos entre os modelos da Honda, Hyundai e Toyota, que mostram suas autonomias e economia de combustível [16].

Veículos não comerciais também são destaque, como o trem Coradia iLint movido a hidrogênio lançado na Alemanha e que alcança uma velocidade de 140 km/h [17] e o caminhão conceito da Toyota [18].

No âmbito nacional, a Câmara de Comércio Exterior publicou uma resolução em outubro de 2015 que isenta veículos elétricos e movidos a hidrogênio do pagamento de imposto de importação para incentivar as vendas, desde que tenham autonomia mínima de 80 km. O imposto para os híbridos fica entre 7% e zero, de acordo com o nível de eficiência energética e o tamanho do motor a combustão [19].

Além disso, 7 estados (Piauí, Maranhão, Ceará, Sergipe, Rio Grande do Sul, Rio Grande do Norte e Pernambuco) isentaram o IPVA dos veículos “verdes” e mais 3 (São Paulo, Rio de Janeiro e Mato Grosso do Sul) oferecem 50% de desconto no imposto. Na cidade de São Paulo, os veículos desta natureza não participam do rodízio de placas aplicado para melhorar o trânsito e a qualidade do ar [19].

O BMW i3 é o único EV comercializado atualmente no Brasil por R\$169.900,00. Dentre os híbridos, o mais barato é o Toyota Prius vendido por R\$123.950,00. Este é considerado também o carro mais econômico do país, com um consumo declarado do Inmetro de 18,9 km/l na cidade e 17 km/l na estrada, podendo fazer até 30 km/l. Há ainda o modelo de luxo da Toyota Lexus CT200h por R\$129.990,00, o Ford Fusion Hybrid por R\$159.500,00, o Mitsubishi Outlander PHEV por R\$204.990,00, que pode se conectar à rede elétrica e o quase exclusivo BMW i8 por R\$799.950,00 [20].

Veículos não comerciais nacionais também são notícia. A Associação Brasileira de Veículos Elétricos reúne algumas informações sobre este panorama e destaca no primeiro semestre de 2017 o primeiro veículo elétrico com tecnologia 100% brasileira [21], que foi apresentado no workshop "Energias Renováveis e Inovações Interconectadas" realizado em abril em Pernambuco, e ainda o ônibus híbrido elétrico-hidrogênio desenvolvido pela COPPE/UFRJ em parceria com Furnas e Tracel que já foi testado e está apto para iniciar sua comercialização [22].

O esforço para implementar as estações de recarga também são notícia, o que mostra um grande interesse na aplicação desses veículos [23],[24].

1.3. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar a configuração básica de um veículo elétrico movido a hidrogênio e seus componentes principais.

Mais especificamente, o trabalho se propõe a contribuir apresentando uma configuração de conversor que pode ser usado para acionar um motor elétrico separando de forma eficiente as quantidades de potência requeridas pela carga de acordo com a possibilidade de fornecimento de cada fonte, como mostra a Figura 1.6.

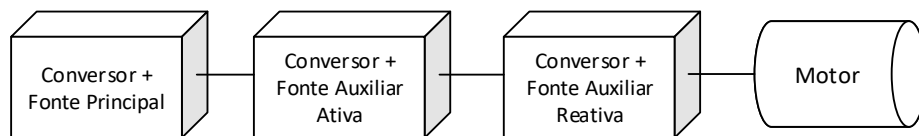


Figura 1.6: Diagrama simplificado da estrutura proposta.

É proposto o controle separado da potência reativa e ativa média e oscilante utilizando os fundamentos da teoria pq aplicados a um conversor modular em cascata híbrido, isto é, que inclui um inversor fonte de tensão (VSI), submódulos alimentados com uma fonte de potência ativa e submódulos capacitivos.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. O primeiro deles apresentou uma introdução aos FCVs incluindo a motivação e os objetivos pretendidos.

No segundo capítulo é apresentada a arquitetura de um FCV e é dado foco aos elementos principais que o compõem, nomeadamente a célula a combustível, os motores elétricos e os conversores de potência.

O terceiro capítulo trata da ampliação da região de enfraquecimento de campo de um motor de indução e apresenta a estrutura do conversor utilizado com a proposta de gerenciar as diversas fontes de energia do FCV. São apresentadas a topologia mínima e a estratégia de controle proposta.

O quarto capítulo mostra as simulações computacionais realizadas para validar o conceito apresentado no capítulo 3. Neste capítulo também é mostrado o protótipo de conversor construído para validação experimental.

O último capítulo aborda as conclusões e propõe futuros trabalhos associados.

2. ENGENHARIA DOS FCVs

Os veículos puramente elétricos ressurgem como uma alternativa aos veículos de combustão interna que, além de poluentes, são ineficientes no aproveitamento da energia disponível nos combustíveis. Um motor à combustão possui uma faixa de eficiência em torno de 30 a 35%, enquanto um sistema de propulsão elétrico pode alcançar cerca de 90% de eficiência [25].

As desvantagens associadas aos veículos elétricos, no geral, dizem respeito ao sistema de armazenamento de energia. As mais críticas são o longo tempo de carga e a faixa de operação limitada por ciclo de carga, que torna o veículo elétrico pouco atrativo em autonomia em relação aos veículos à combustão [26]. Muito tem sido estudado e feito para diminuir o tempo de carga e aumentar a autonomia dos veículos elétricos [27]-[29], mas atualmente, a aposta do mercado é nos veículos híbridos que são capazes de associar as vantagens de ambos os modelos elétrico e a combustão.

Os veículos movidos a hidrogênio que utilizam células a combustível são equiparáveis aos veículos de combustão em termos de desempenho, alcançando uma autonomia de quase 600 km e tempo de recarga de cerca de 3 minutos [30]. Em sua arquitetura, apesar de serem puramente elétricos, os FCVs são similares aos veículos híbridos do tipo série [2],[31], onde o conjunto tanque de combustível, motor à combustão e alternador é substituído pelo cilindro de armazenamento de hidrogênio, célula a combustível e conversor de potência. Na Figura 2.1 é apresentada a arquitetura simplificada de um FCV e a Figura 2.2 mostra o sistema do Toyota Mirai.

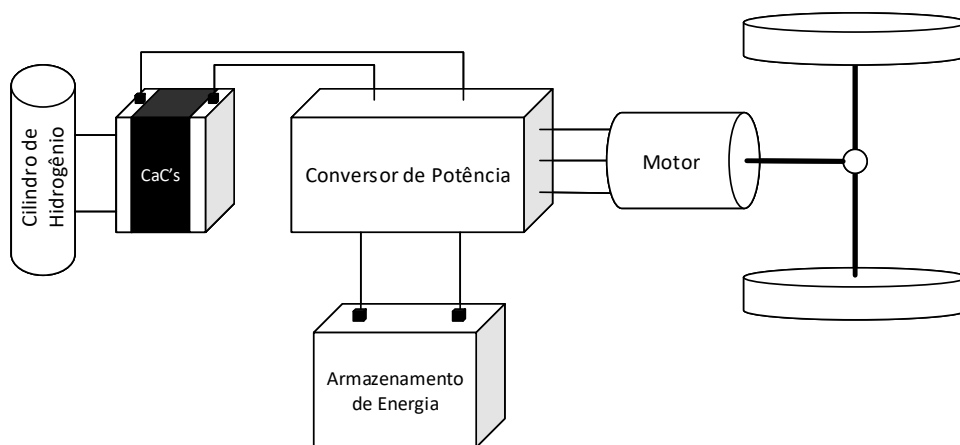


Figura 2.1: Arquitetura básica de um FCV.

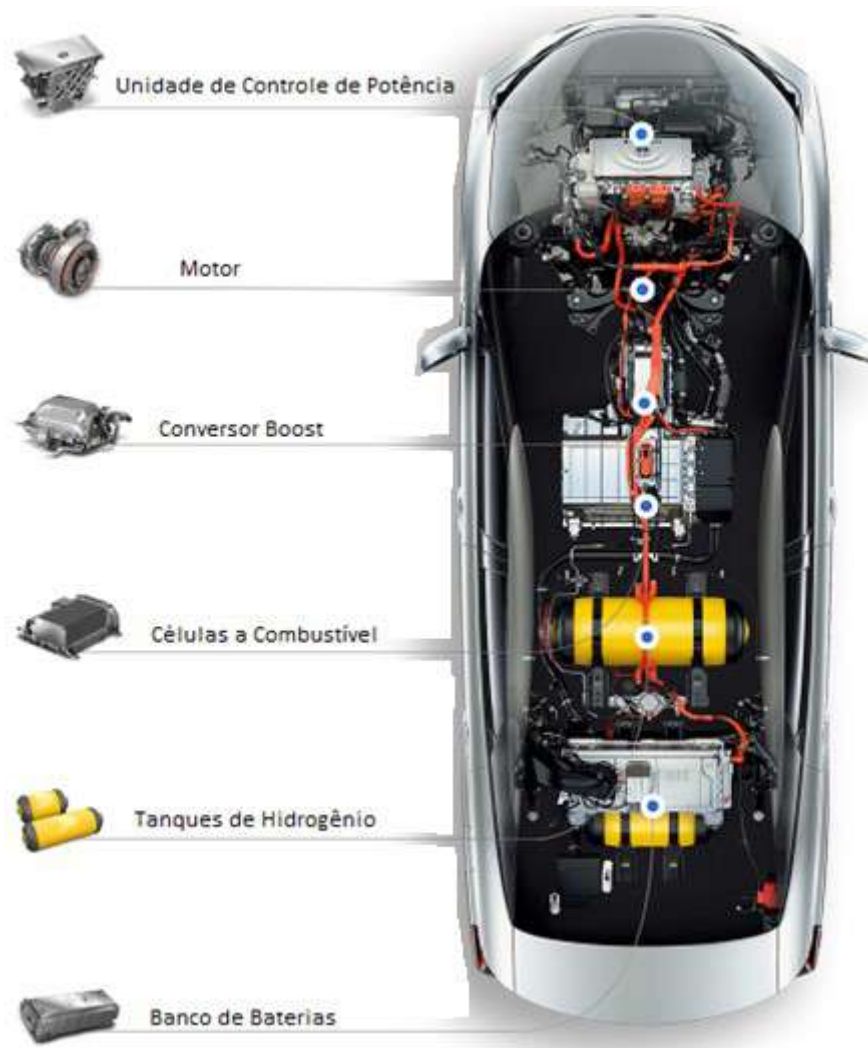


Figura 2.2: Toyota Mirai. Adaptada de [32].

Como será mostrado na seção seguinte, o comportamento dinâmico de uma célula a combustível é lento (se comparado a um supercapacitor, por exemplo) e, por isso, esta fonte de energia necessita de um dispositivo auxiliar para suprir os transitórios de potência solicitados na operação, como, por exemplo, na aceleração ou frenagem do veículo. Assim, a energia produzida pelas CaCs é utilizada tanto para a propulsão do motor em operação com potência constante, como pode ser armazenada em baterias para uso futuro.

Além do fato da célula a combustível ser uma fonte de potência ativa que não opera bem com grandes variações de potência, deve-se atentar também para o fato de que os motores elétricos demandam tanto potência ativa como potência reativa em seu funcionamento.

Para que todo o sistema de propulsão de um FCV possua uma alta eficiência a um custo aceitável, a ideia básica é fazer com que todos os componentes pertencentes a ele operem com o maior aproveitamento possível. Isto significaria:

- A célula a combustível operar fornecendo a potência média demandada;
- As maiores variações de demanda, ou transitórios de potência, seriam fornecidos pelo banco de baterias ou outro componente armazenador de energia (super/ultracapacitores);
- A potência reativa seria fornecida pelo conversor de potência.

Para tanto, deve-se escolher uma topologia de conversor que permita a operação com diversas fontes de potência ativa e reativa associadas e se faz necessário um método de controle que seja capaz de determinar essa separação de potência de forma rápida e eficaz.

Neste capítulo serão apresentados e detalhados os principais componentes do sistema de propulsão de um FCV, nomeadamente: as células a combustível, os motores elétricos e os conversores de potência.

2.1. CÉLULA A COMBUSTÍVEL

A célula a combustível (CaC) é o dispositivo responsável pela conversão da energia química do hidrogênio em eletricidade. Esse processo se dá pelas reações eletroquímicas de oxidação do hidrogênio e redução do oxigênio do ar resultando em vapor de água e calor.

Uma CaC é composta basicamente por dois eletrodos, catodo e anodo, e um eletrólito que os separa. Existem cinco tipos diferentes de CaCs que são classificadas de acordo com o material utilizado como eletrólito [33], são elas:

- Alcalina;
- Polímero sólido;
- Ácido fosfórico;
- Carbonato fundido e
- Óxido sólido.

As células de ácido fosfórico, as de óxido sólido e as de carbonato fundido são mais utilizadas em aplicações estacionárias e em potências mais elevadas (podendo chegar a MWs). As células alcalinas e de ácido fosfórico já foram utilizadas para

aplicações automotivas, porém as células de polímero sólido são as mais indicadas atualmente.

As células de polímero sólido são divididas em Membrana Trocadora de Prótons ou PEM (da sigla em inglês, *Proton Exchange Membrane*) e Metanol Direto ou DMFC (da sigla em inglês, *Direct Methanol Fuel Cell*). As DMFC evitam a necessidade de armazenamento de hidrogênio a bordo, já que o combustível utilizado é uma solução de metanol diluído em água, ao custo de emitir localmente dióxido de carbono (CO_2) como produto da reação.

Para aplicação veicular com zero emissão local de carbono, as CaCs mais utilizadas são as do tipo PEM. Estas ainda possuem limitações que influenciam principalmente no seu alto custo e estão em constante desenvolvimento principalmente em relação à membrana trocadora de prótons [34].

A Figura 2.3 [35] mostra o funcionamento básico de uma CaC do tipo PEM. O gás hidrogênio que é fornecido à CaC reage ao entrar em contato com o anodo liberando íons H^+ e elétrons. Os íons H^+ , também chamados prótons, atravessam o eletrólito e os elétrons seguem para circuito elétrico externo formando uma corrente elétrica. Ao alcançarem o catodo, os prótons se combinam com o oxigênio do ar e com os elétrons formando vapor de água. Há ainda a liberação de calor de baixa temperatura na CaC do tipo PEM em decorrência das perdas nas reações.

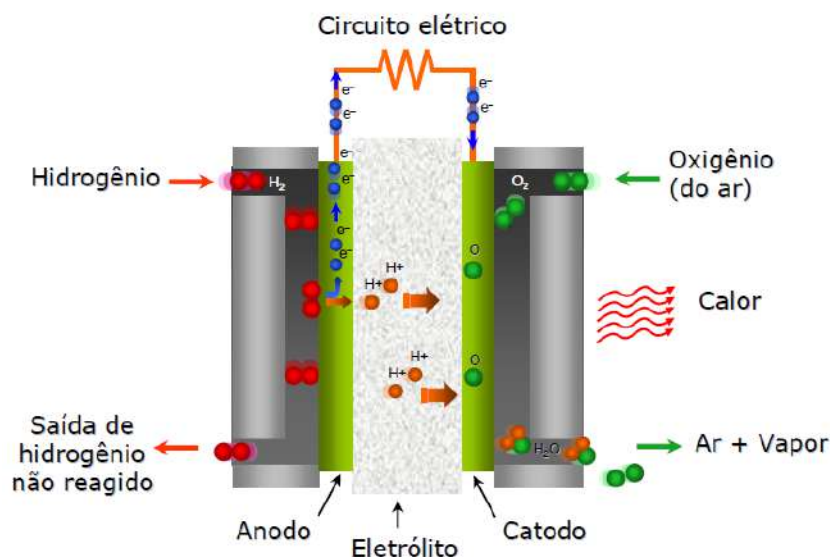
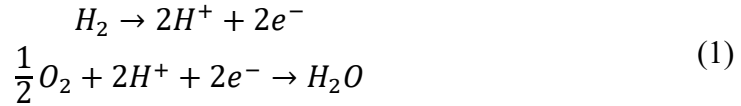


Figura 2.3: Célula à Combustível. Fonte [35].

De maneira simplificada, as reações que ocorrem no anodo e no catodo de uma CaC podem ser escritas como:



Somadas as duas equações, tem-se a reação global:



O potencial termodinâmico desta reação é dado pela variação da energia livre de Gibbs utilizada para movimentar 2 elétrons [33]. Considerando que a temperatura e a pressão dos gases influenciam na energia disponível, chega-se a seguinte equação que representa o potencial reversível ou potencial de Nernst para uma CaC:

$$E_{Nernst} = E_{rev}^0 + \frac{RT}{2F} \ln(p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}), \tag{3}$$

onde:

R é a constante dos gases, $8,3143 \frac{J}{mol.K}$;

F é a constante de Faraday $96487 C/mol$;

T é a temperatura em Kelvin;

p_{H_2} é a pressão parcial do hidrogênio;

p_{O_2} é a pressão parcial do oxigênio e

E_{rev}^0 é o potencial reversível à pressão atmosférica.

A equação (3) representa o potencial disponível nos terminais de uma CaC, que é cerca de 1,2V (na temperatura de 25°C e pressão de 1 bar), desconsiderando as perdas ou irreversibilidades, como são chamadas as perdas em sistemas termodinâmicos e eletroquímicos.

As irreversibilidades envolvidas em uma CaC são os chamados sobrepotenciais de ativação, ôhmico e de concentração. Esses fenômenos diminuem a tensão disponível nos terminais da CaC que pode ser então dada por [36]:

$$V_{out} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}, \tag{4}$$

onde:

V_{act} é o sobrepotencial de ativação;

V_{ohm} é o sobrepotencial ôhmico e

V_{conc} é o sobrepotencial de concentração.

O sobrepotencial de ativação é a perda envolvida na ativação das reações químicas que ocorrem nas superfícies dos eletrodos da CaC. Este efeito é mais pronunciado em baixas correntes. O sobrepotencial ôhmico está associado à resistência ao fluxo de elétrons nos eletrodos e demais condutores e à resistência ao fluxo de

prótons no eletrólito. Há ainda um efeito resistivo de contato que está associado aos aspectos construtivos da CaC. O sobrepotencial de concentração ocorre devido ao gradiente de concentração que se forma no transporte de massas. Em correntes altas, uma “lentidão” no transporte dos reagentes, ou mesmo a falta deles, resulta em uma variação na pressão dos gases e consequente alteração no potencial de Nernst.

Uma curva de polarização característica de uma célula a combustível genérica é mostrada na Figura 2.4: Curva de Polarização de uma CaC., onde se podem observar as três regiões características de ativação, ôhmica ou linear e de concentração.

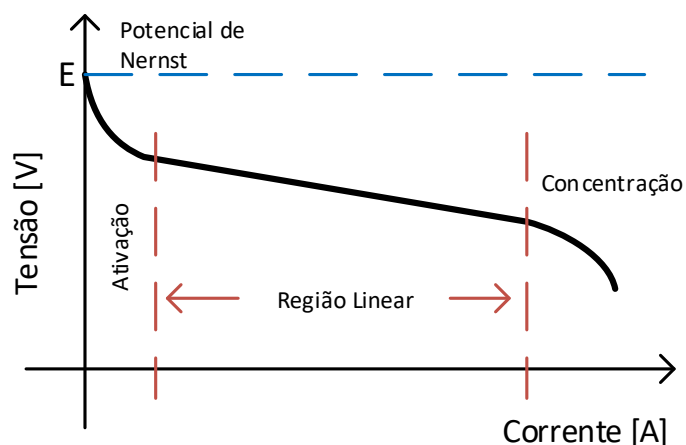


Figura 2.4: Curva de Polarização de uma CaC.

Na CaC os dois eletrodos são separados por um eletrólito que permite apenas o transporte de prótons e bloqueia os elétrons. Os elétrons fluirão pelo anodo para o circuito externo e retornarão pelo catodo aonde, ao mesmo tempo, chegarão os prótons. Assim, duas camadas carregadas com polaridades opostas se formarão na superfície entre o catodo e o eletrólito. Este efeito, chamado Dupla Camada de Carga, resulta em um armazenamento de energia na forma de campo elétrico, similar a um capacitor, alterando a dinâmica de operação da CaC.

Devido às suas características termodinâmicas e eletroquímicas, as CaCs não são capazes de responder rapidamente a transitórios de carga, se comparadas por exemplo aos supercapacitores [37]. Desta forma, é desejável que sua operação se dê com potência constante para que não incorra em problemas que podem afetar a sua vida útil. Por isso o desempenho na partida de um veículo alimentado apenas por uma CaC pode ser pior que o de um veículo convencional e, conseqüentemente, deve-se adicionar um sistema de armazenamento de energia que auxilie nos transitórios de aceleração.

2.2. MOTORES ELÉTRICOS PARA TRACÇÃO

A escolha do tipo de máquina utilizada na propulsão dos veículos híbridos e elétricos à bateria ou movidos a hidrogênio impacta substancialmente na eficiência e no custo do grupo de acionamento.

O motor de um veículo, diferente dos utilizados em aplicações industriais, precisa frequentemente ligar e desligar, acelerar e desacelerar em diferentes condições, como subidas e estradas, e ainda enfrentar diversas severidades associadas a condições ambientais, como pistas esburacadas ou chuva [25]. Atualmente, há três tipos de máquinas elétricas que são de interesse da indústria para aplicação em tração veicular, nomeadamente: motor de indução, motor síncrono de ímãs permanentes e motor de relutância chaveada [38]. A Figura 2.5 mostra a vista em corte de cada uma destas máquinas.

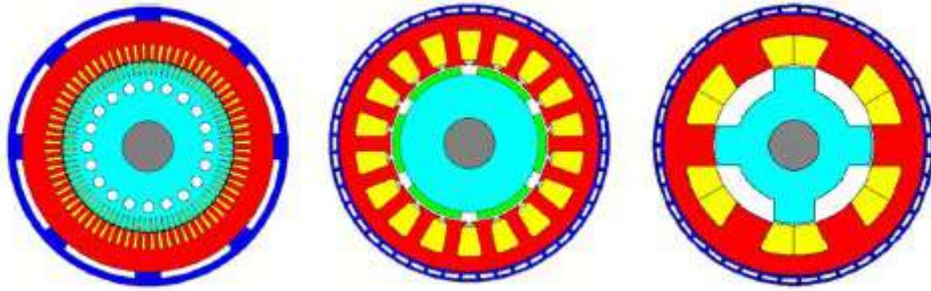


Figura 2.5: Vista em corte dos motores. Da esquerda para a direita: indução, síncrono de ímãs permanentes e relutância chaveada [40].

Diversos estudos comparativos entre os motores aplicados nos veículos híbridos e elétricos foram produzidos ao longo dos anos [38]-[42]. A evolução no estudo das máquinas [43] e em suas técnicas de controle [44] faz com que a escolha por um ou outro tipo seja dinâmica. Porém, ambos os estudos, mais antigos ou atuais, convergem para as mesmas características desejáveis aos motores para propulsão elétrica [45]:

- Alta densidade de torque e potência;
- Alto torque de partida, para baixas velocidade e subidas, e alta potência na velocidade de cruzeiro;
- Ampla faixa de velocidade com operação em potência constante;
- Alta eficiência em toda a faixa de velocidade e torque;
- Altas confiabilidade e robustez e
- Custo aceitável.

Outras características desejáveis são a baixa oscilação de torque, capacidade de suportar sobrecarga por um determinado intervalo de tempo e baixo ruído audível.

A Figura 2.6 é uma ilustração da característica de operação típica de um motor elétrico para tração veicular. Ela mostra o perfil de torque, tensão e corrente pela velocidade. Qualquer motor elétrico de tração pode ser projetado para operar conforme este perfil, ficando, contudo, limitado pelas características do inversor utilizado para o seu acionamento com variação da velocidade.

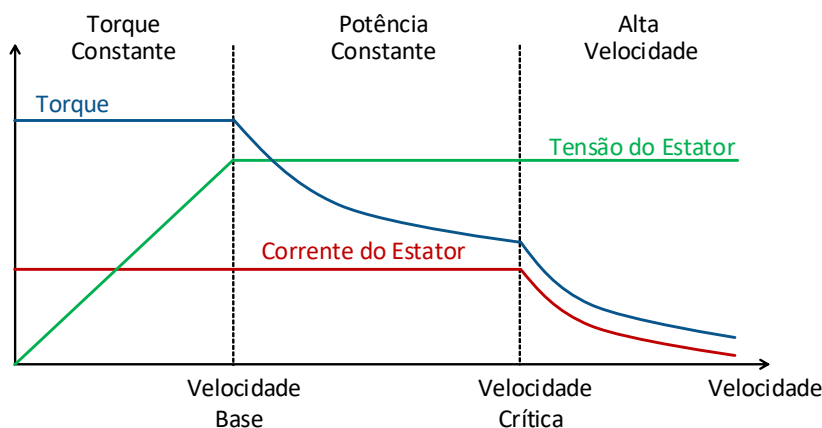


Figura 2.6: Características de torque e potência ideais.

Na região de torque constante, a máxima capacidade de torque pode ser atingida para qualquer valor de velocidade, ficando limitada apenas pela capacidade de corrente do inversor. A partir da velocidade base, os valores de tensão e corrente passam a ser limitados e qualquer aumento de velocidade resulta em perda da capacidade de torque. Esta segunda região é denominada região de enfraquecimento de campo ou comutação por avanço de fase², onde a potência é constante e o torque decai proporcionalmente com a velocidade. A partir de uma dada velocidade, denominada velocidade crítica, a potência não pode mais ser mantida constante e o torque passa a cair com o quadrado da velocidade.

A seguir é apresentado um resumo sobre as características principais dos motores citados e suas vantagens e desvantagens.

2.2.1. MOTOR DE INDUÇÃO

A máquina de indução é uma opção válida a ser utilizada em veículos elétricos devido a sua simplicidade – possuindo uma técnica de fabricação bem estabelecida – e

² Específico para máquinas de ímãs permanentes ou de relutância chaveada.

custo relativamente baixo, baixa necessidade de manutenção, alta confiabilidade, gama alta de velocidade de operação e robustez.

Usando controle vetorial, a máquina de indução é capaz de operar como uma máquina CC, desacoplando os controles de torque e do campo. Assim, é possível estender sua região de operação com potência constante a 4-5 vezes o valor da velocidade base. Um bom desempenho dinâmico também pode ser alcançado com técnica de controle direto do torque (DTC).

Sua eficiência é menor se comparado a um motor de ímã permanente, devido a perdas inerentes no rotor. Pela mesma razão, a máquina de indução é geralmente maior que a máquina de ímã com mesma potência e velocidade nominal. Possui como desvantagem também o seu baixo fator de potência.

Estas desvantagens, porém, não impedem sua aplicação em veículos comerciais. A Tesla Motors, por exemplo, que fabrica apenas veículos elétricos, aposta nesta tecnologia. A Hyundai lançou recentemente seu modelo ix35 Fuel Cell movido a hidrogênio e utiliza um motor de indução [10].

2.2.2. MOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃ PERMANENTE

As máquinas síncronas de ímãs permanentes se desenvolveram muito nas últimas três décadas e são as mais utilizadas atualmente nas aplicações veiculares. Se comparados aos motores de indução, possuem maior densidade de potência e são mais eficientes devido à excitação do campo feita pelos ímãs. Por serem mais compactos e leves, se adequam bem à aplicação veicular e são mais eficientes também na dissipação de calor para a atmosfera.

Estes motores, porém, possuem uma capacidade de enfraquecimento de campo limitada, o que diminui bastante a sua região de operação com potência constante, que pode ser ampliada para 3-4 vezes o valor da velocidade base utilizando algoritmos de controle apropriados.

Existem diferentes tipos de motores de ímãs permanentes e estes são classificados de acordo com a localização dos ímãs. Na configuração mais convencional os ímãs são colocados na superfície do rotor. No chamado IPM, da sigla em inglês para ímã permanente interior, os ímãs são alocados em ranhuras no interior do rotor acrescentando ao torque uma componente devida à variação da relutância, semelhante à máquina de polos salientes. Com isso é possível operar em situação de enfraquecimento de campo ampliando a região de potência constante.

Outra configuração que surge para melhorar a eficiência e ampliar a faixa de velocidade dos motores de ímãs é a chamada híbrida, onde um enrolamento de campo é adicionado para ampliar a capacidade de controle da máquina [25],[40],[45].

Atualmente o que tem dificultado o uso desse tipo de máquina e ampliado a procura por novas tecnologias é o alto custo e suprimento dos materiais de terras raras utilizados como ímãs [46].

Diversas montadoras usam os motores de ímãs permanentes em suas linhas de veículos híbrido e elétricos. Destacam-se aqui os lançamentos no ano de 2016 dos carros movidos a hidrogênio da Toyota e da Honda. O Mirai possui a base (plataforma) do Toyota Prius [32] e o Clarity Fuel Cell possui a base do Honda Accord Hybrid [47].

2.2.3. MOTOR DE RELUTÂNCIA CHAVEADA

De construção simples e robusta, sem ímãs ou enrolamentos, o motor de relutância chaveada pode operar satisfatoriamente em alta velocidade e com altas temperaturas. Embora possua algumas sutilezas na sua fabricação, seu custo é relativamente baixo pela sua simplicidade. Este tipo de máquina é também tolerante a faltas e pode ser controlada de maneira simples por excitação sequencial das bobinas do estator.

Possui como desvantagem uma baixa capacidade de torque, inclusive de curta duração, para operação suave em baixa velocidade, perdas significativas no ferro, necessidade de um perfil de forma de onda de corrente complexo por fase e medição acurada da posição do rotor. Outras características que ainda inviabilizam sua utilização de forma comercial para aplicação veicular são ruído audível, vibração e oscilação de torque que tendem a ser altos. Mesmo ainda em desenvolvimento para essa aplicação [48], elas são atrativas no geral para veículos maiores como John Deere 944K [38].

Há ainda montadoras, como a General Motors, que preferem não se ater às configurações tradicionais de motores e customizam suas próprias máquinas de acordo com as necessidades de aplicação [47].

Neste trabalho será abordado apenas o motor de indução, que, apesar de ter uma densidade menor de potência e torque em relação ao de ímãs permanentes, apresenta alta confiabilidade e robustez e menor custo.

2.3. CONVERSORES DE POTÊNCIA

Os conversores de potência são utilizados nos veículos elétricos para controlar, gerenciar e otimizar o fluxo de potência entre as diversas fontes de energia e as cargas, sendo considerados assim o coração do sistema de propulsão.

O conversor influencia diretamente no desempenho do veículo e no aproveitamento das fontes de energia. Para tanto, é necessário atentar para a configuração adequada e características físicas como peso e volume que favoreçam não apenas o condicionamento de potência, mas também uma melhor distribuição no veículo e um sistema de arrefecimento adequado.

A interface para o motor elétrico é feita por um inversor, seja nos FCV ou puramente elétrico, pois as baterias e CaCs fornecem corrente contínua e o motor opera em corrente alternada. Para nivelar a tensão das fontes e fazer com que elas sejam compatíveis com a alimentação do motor, utiliza-se um conversor CC-CC para conectá-las ao lado CC do inversor. É interessante ainda que as configurações de ambos os conversores sejam bidirecionais permitindo a recuperação e o armazenamento de energia na desaceleração e frenagem regenerativa.

Segundo KUMAR *et al.* [25], nas arquiteturas mais avançadas dos veículos elétricos é esperado ter diferentes fontes de energia e cargas que possuam características VxI e respostas dinâmicas distintas conectadas a um único barramento CC, similar a uma rede inteligente de distribuição CC. EMADI *et al.* [50] mostra a configuração em blocos de um sistema para um ônibus movido a hidrogênio que possui estas características, Figura 2.7.

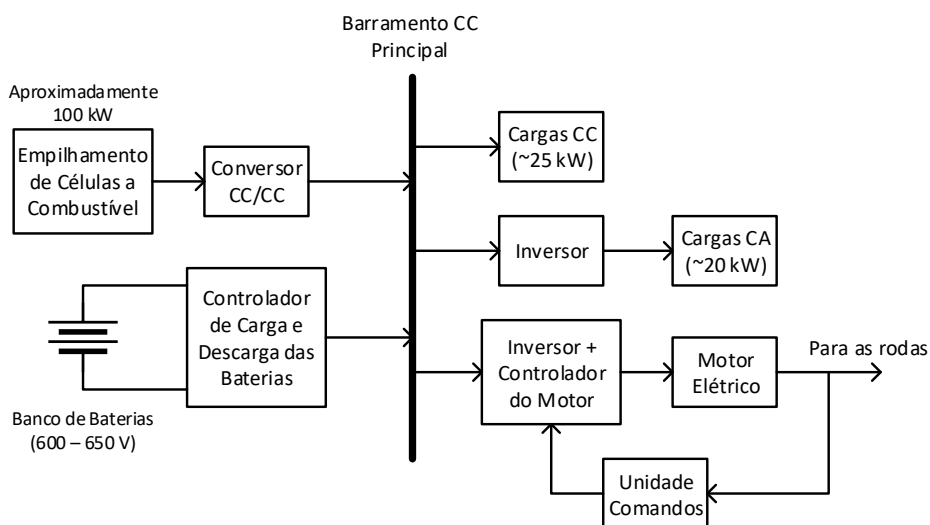


Figura 2.7: Esquema típico de um ônibus movido a hidrogênio. Adaptada de [50].

Ao longo dos anos, diversos trabalhos foram publicados mostrando diferentes formas de configurações para os sistemas dos FCVs. Alguns utilizam simples associações dos conversores convencionais, incluindo isolamento galvânico como mostrado na Figura 2.8, ou formas diferentes de controle e modulação.

Outras configurações ou associações de conversores surgem como soluções interessantes. SOLERO *et al.* [52] sugere uma configuração de um conversor de múltipla entrada, para acoplar a CaC a um banco de baterias e um ultracapacitor, cuja base é um inversor comercial. Ao conectá-lo de maneira inversa, o autor utiliza cada uma de suas fases para controlar de maneira independente o fornecimento de energia de cada uma das fontes e criar um barramento CC com o nível de tensão adequado que será associado ao inversor que alimenta o motor. A Figura 2.9 mostra essa solução.

NEUBURGER *et al.* [53] sugere uma configuração onde o empilhamento de CaCs é conectado diretamente aos terminais do motor no chamado *star point*, ou ponto de conexão estrela (neutro) dos enrolamentos do estator da máquina, como mostra a Figura 2.10.

Já ATTAIANESE *et al.* [54] utiliza uma configuração de duplo conversor em que são associados dois inversores aos enrolamentos abertos de uma máquina, como mostra a Figura 2.11. Nesta topologia é utilizado um supercapacitor em substituição ao banco de baterias.

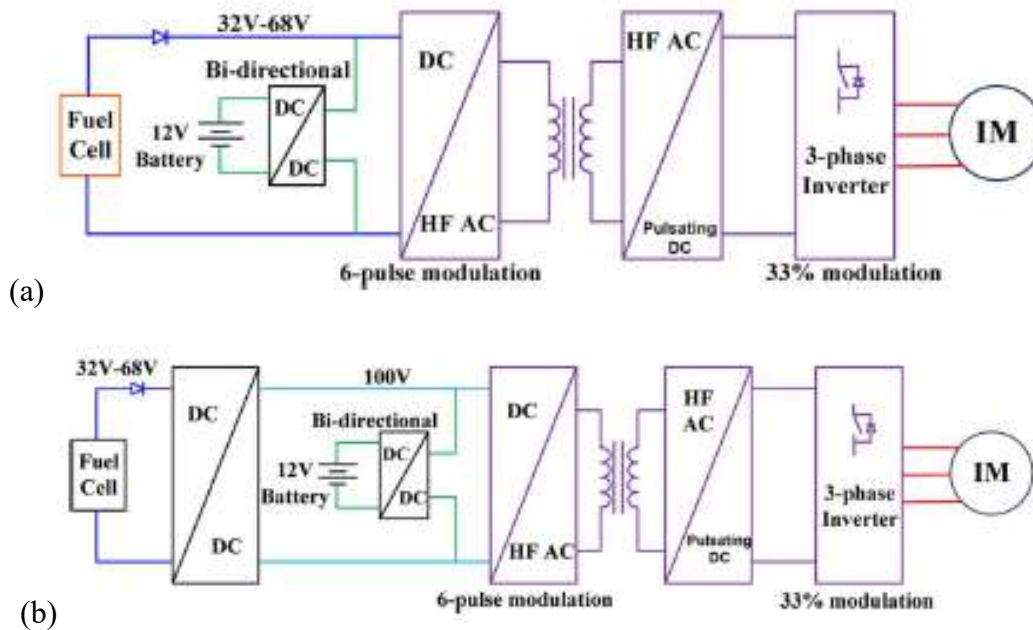


Figura 2.8: Conversor para FCV: (a) tensão CC variável e (b) tensão CC fixa. Fonte [51]

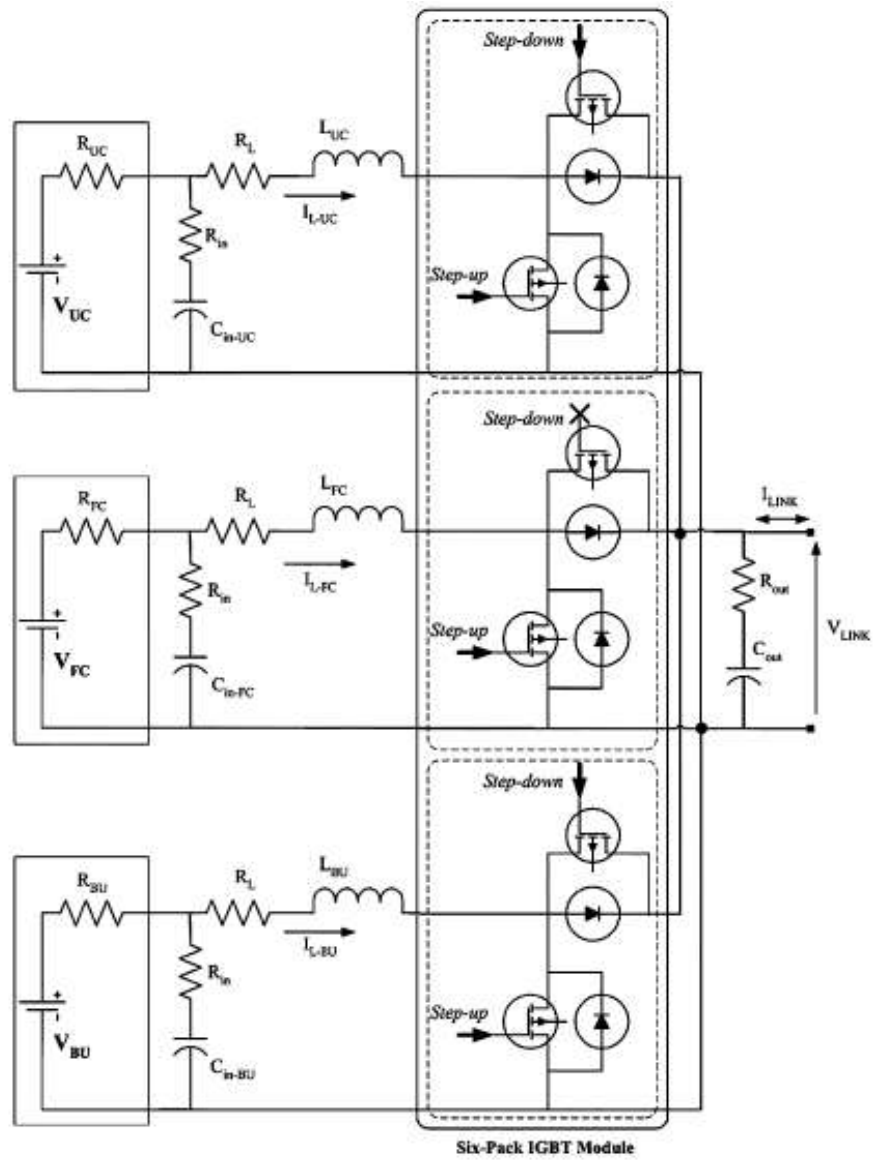


Figura 2.9: Conversor de múltiplas entradas. Fonte [52].

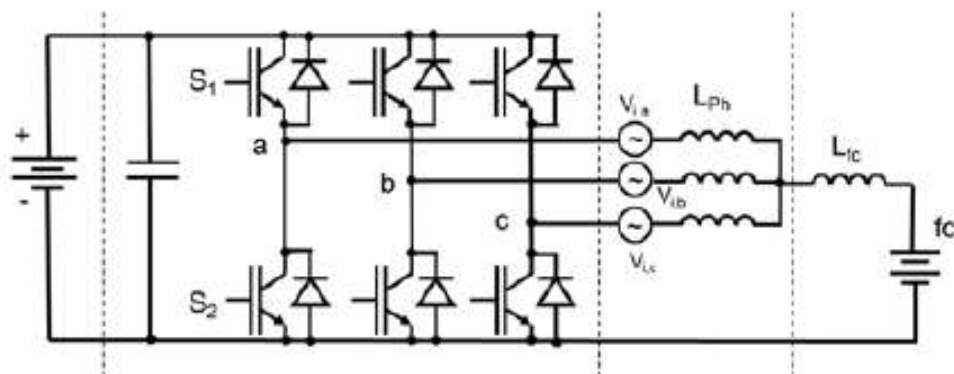


Figura 2.10: Topologia proposta por Neuburger. Fonte [53].

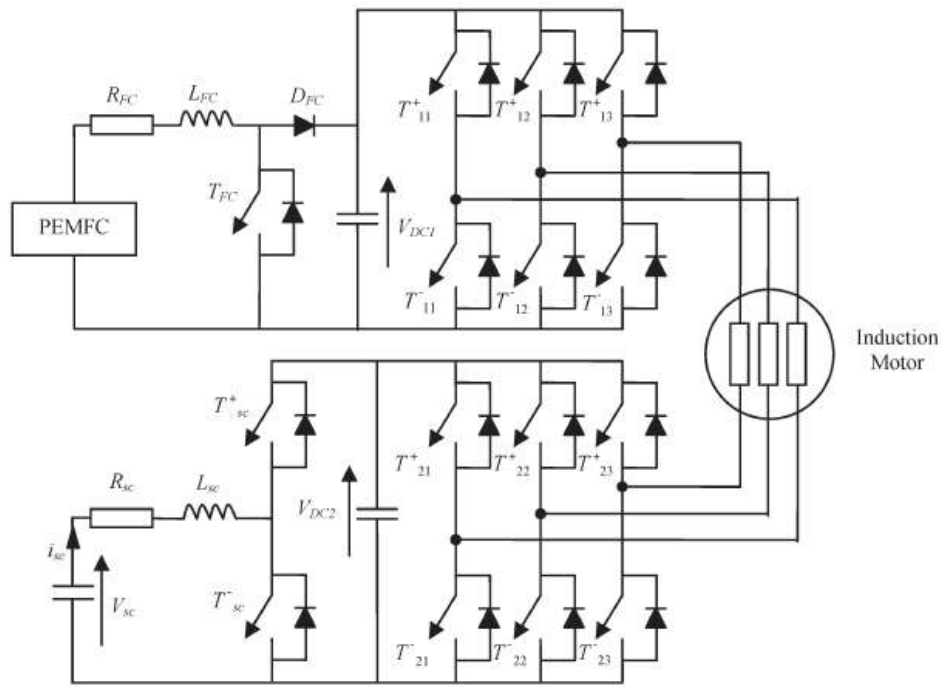


Figura 2.11: Duplo conversor. Fonte [54].

A associação de múltiplos empilhamentos de CaCs também tem sido bastante estudada. MARX *et al.* [55] ressalta que este tipo de associação modular é bastante interessante para aplicação veicular podendo melhorar o desempenho do sistema em nível de potência de saída e eficiência e ainda aumentar sua confiabilidade por conta da redundância. Em relação à conexão elétrica de empilhamentos, são mostradas na Figura 2.12 quatro configurações diferentes: série, paralelo, cascata e serie-paralelo.

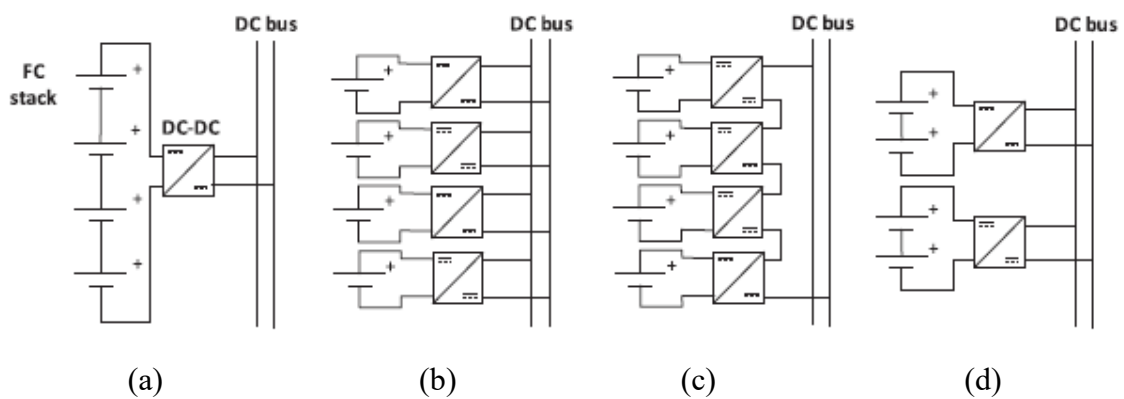


Figura 2.12: Conexões de múltiplos empilhamentos de CaCs: (a) Série, (b) Paralelo, (c) Cascata e (d) Série-Paralelo. Fonte [55].

Apesar dos avanços na área, nos veículos comerciais ainda são utilizadas as configurações convencionais.

3. METODOLOGIA

As máquinas de indução aplicadas aos veículos elétricos possuem diversas vantagens e algumas características indesejáveis, como mencionado no capítulo anterior. Foi visto também que um melhor aproveitamento do motor através da ampliação da faixa de velocidade com operação em potência constante pode ser alcançado com uma configuração de conversor e algoritmo de controle adequado.

Existem diversas topologias de conversores capazes de atender as especificações necessárias a um sistema de propulsão elétrica. A contribuição proposta nesta etapa é a utilização de uma configuração modular em cascata que permite o gerenciamento do fornecimento de energia a partir de diversas fontes e adicionalmente compensa os reativos necessários para melhorar a eficiência do sistema.

Nas seções posteriores serão mostrados: as características do motor de indução que podem ser controladas para a ampliação da faixa de operação com potência constante, detalhes da topologia dos conversores que permitem ampliar a faixa de potência constante e ao mesmo tempo gerenciar as fontes de energia de um veículo movido a hidrogênio e o método de controle sugerido.

3.1. VELOCIDADE E A REGIÃO DE ENFRAQUECIMENTO DE CAMPO

Um motor de indução trifásico em regime permanente pode ser caracterizado levando em conta alguns pontos principais da sua relação torque-velocidade [56]. O torque desenvolvido em regime permanente é dado por:

$$T_{em} = \frac{3V_s^2 R_r}{s\omega_b \left[\left(R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_s + X_r)^2 \right]}, \quad (5)$$

onde V_s é a tensão de alimentação da máquina, s é o escorregamento, ω_b é a velocidade base, R_s e X_s são a resistência e reatância de dispersão do estator e R_r e X_r são a resistência e reatância de dispersão do rotor referidas ao estator da máquina.

O torque máximo pode ser escrito como:

$$T_{m\acute{a}x} \propto \frac{V_s^2}{f_b(X_s + X_r)} \propto \frac{\psi_s^2}{L_s + L_r}, \quad (6)$$

onde ψ_s é o fluxo enlaçado do estator, f_b é a frequência base, L_s e L_r são as indutâncias do estator e do rotor, respectivamente.

O torque de partida acontece quando o escorregamento é unitário:

$$T_{st} = \frac{3V_s^2 R_r}{\omega_b [(R_s + R_r)^2 + (X_s + X_r)^2]}. \quad (7)$$

E a corrente de partida é calculada como:

$$I_{st} = \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_s + X_r)^2}} \quad (8)$$

É importante notar que o torque máximo desenvolvido na máquina é proporcional ao quadrado da tensão de alimentação ou ao fluxo do estator e inversamente proporcional ao quadrado da frequência de alimentação.

Alto torque e baixa corrente de partida podem ser alcançados quando a máquina é alimentada por um inversor com tensão e frequência variáveis. Porém, a gama de velocidade é limitada pela capacidade do inversor e pelo torque máximo em altas velocidades.

Analisando a Figura 2.6 e a equação (2) é possível perceber que, quando a velocidade base é atingida, a tensão nominal também é alcançada e, não podendo ser excedida, o fluxo começa a diminuir. Com um controle mínimo do escorregamento é possível fazer com que a corrente se mantenha constante e o torque máximo caia com o inverso do fluxo, formando assim a chamada região de potência constante [57].

Na região de potência constante, ou enfraquecimento de campo, onde o fluxo é reduzido com o aumento da frequência, há uma redução do torque máximo que se agrava com a queda de tensão através da reatância de magnetização devido a influencia da reatância de dispersão. Assim, para manter este controle de fluxo em altas velocidades seria necessário aumentar a tensão de alimentação acima do valor nominal para manter a operação em potência constante [58].

A Figura 3.1 apresenta o modelo de circuito equivalente por fase de um motor de indução em regime permanente. A tensão de alimentação da máquina é composta por 3 parcelas que representam as perdas ôhmicas e reatância de dispersão nos enrolamentos do estator e a tensão induzida no rotor.

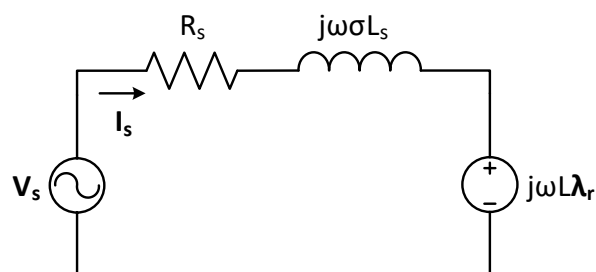


Figura 3.1: Modelo de circuito equivalente por fase de um motor de indução em regime permanente.

As equações que descrevem a tensão de alimentação e o fluxo enlaçado do rotor de forma fasorial são dadas por [59]:

$$\vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + j\omega L_s \vec{I}_s + j\omega \frac{L_m}{L_r} \vec{\lambda}_r, \quad (9)$$

$$\vec{\lambda}_r = L_m \vec{I}_d, \quad (10)$$

onde ω é a velocidade, L_m é a indutância de magnetização, $\vec{\lambda}_r$ é o fluxo enlaçado no rotor, \vec{I}_s é a corrente do estator e \vec{I}_d é a projeção da corrente do estator na direção do fluxo enlaçado no rotor.

A Figura 3.2 mostra o diagrama fasorial para a velocidade base e para uma velocidade acima da velocidade base.

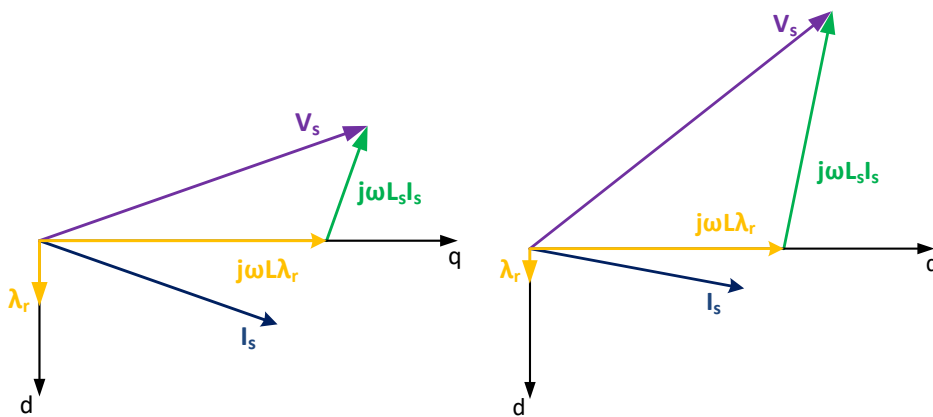


Figura 3.2: Diagrama fasorial de um motor de indução em regime permanente para velocidade base e velocidade acima da velocidade base.

Com isso, fica evidente que, para ampliar a gama de velocidade de operação com potência constante, é desejável compensar as parcelas reativas de tensão.

3.2. TOPOLOGIA DO CONVERSOR DE POTÊNCIA

Com o objetivo de ampliar a região de operação em potência constante de um motor de indução, são apresentadas algumas alternativas de conversores e controle. A configuração de duplo conversor é uma das soluções relatadas na literatura [59]-[61]. A Figura 3.3 mostra o conceito do duplo conversor com compensação da parcela reativa da tensão.

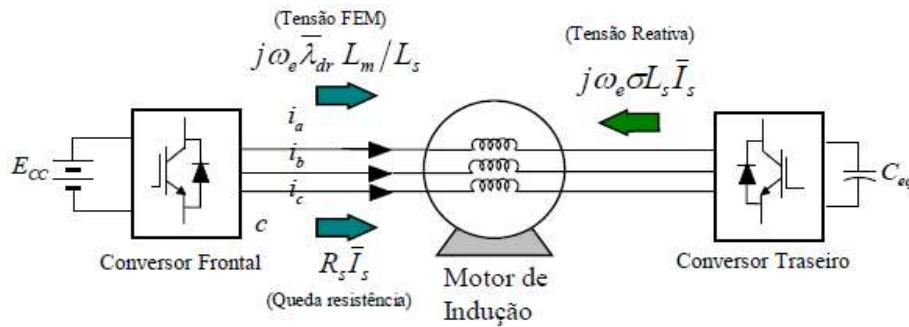


Figura 3.3: Topologia de duplo conversor. Fonte [62].

As vantagens desta configuração são, segundo RUEDA [62], a possibilidade de melhorar o fator de potência no conversor alimentado por uma fonte de potência ativa, resultando em menores correntes requeridas para uma velocidade de operação mais alta e a elevação da tensão nos terminais do motor para uma mesma fonte CC. KIM *et al.* [59] relata que, se a parte reativa da tensão for suprida por um segundo conversor, o nível da tensão no lado CC é melhorado em até 30%.

Configuração similar foi apresentada na Figura 2.11 para gerenciamento de energia em um veículo movido a hidrogênio que utiliza como fonte auxiliar um banco de supercapacitores. ATTAIANESE *et al.* [54] ressalta como características dessa topologia: a possibilidade de operar com baixas tensões eliminando a necessidade de um conversor *boost*; a compensação instantânea da queda de tensão na saída do conversor com o empilhamento de CaCs durante os transitórios de carga; possibilidade de otimizar a estratégia de modulação e conseqüentemente a eficiência do conversor devido à configuração em cascata; possibilidade de suprir transitórios curtos de aceleração e desaceleração diretamente pelo banco de supercapacitores sem envolver o empilhamento de CaCs; possibilidade de aumentar o desempenho dinâmico do motor durante o transitório; redundância que garante a propulsão mesmo na ocorrência de falta.

Nota-se então que esta é uma configuração que atende a ambos os interesses, podendo unir, usando um algoritmo de controle adequado, os benefícios da ampliação da região de operação com potência constante e o gerenciamento de energia entre as fontes utilizadas para a propulsão em um veículo movido a hidrogênio.

Uma desvantagem que a configuração de duplo conversor apresenta é a necessidade do acesso a ambos os terminais dos enrolamentos do motor. A topologia relatada por DU *et al.* [63], mostrada na Figura 3.4, pode ser aplicável à separação das

parcelas da tensão ativa e reativa de tal maneira que essa melhoria fosse feita por apenas um terminal da máquina. Os autores ressaltam que, nesta configuração que inclui um submódulo em ponte H em série com cada fase do VSI, é possível operar de maneira independente o controle do VSI e das pontes em cascata.

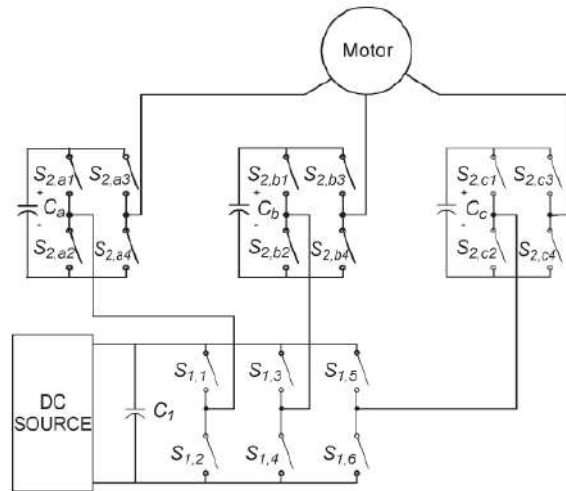


Figura 3.4: Inversor boost multinível com ponte H em cascata sem indutor. Fonte [63].

A topologia modular para a aplicação veicular permite ainda adicionar outras funcionalidades ao conversor. Utilizando baterias como suprimento de energia, é possível associar diversos módulos de baixa tensão para atingir o nível de tensão necessário para acionar o motor e ainda operar como BMS (sigla em inglês para sistema de gerenciamento de baterias) [64] ou fazer a conexão com a rede elétrica num sistema bidirecional de V2G (sigla em inglês para veículo para rede) [65].

Feitas essas considerações, a topologia mínima do conversor sugerida neste trabalho é constituída de um VSI para conectar um empilhamento de CaCs com dois submódulos em cascata (SM), como mostra a Figura 3.5.

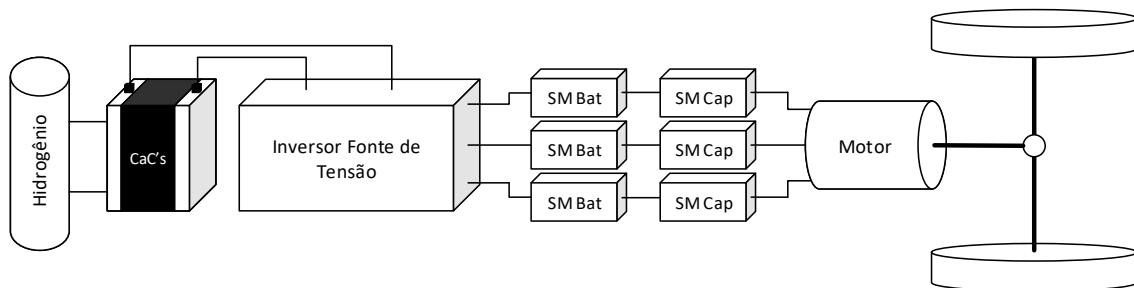


Figura 3.5: Topologia mínima do conversor proposto.

Cada submódulo em cascata é constituído por um circuito de meia ponte. Um grupo é alimentado por uma fonte de potência ativa (bateria) e o outro por capacitores, como mostra a Figura 3.6.

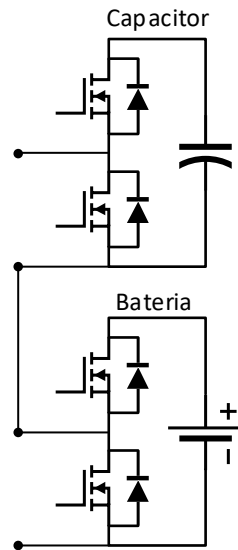


Figura 3.6: Circuitos meia ponte dos submódulos por fase.

Com esta topologia híbrida e um controle adequado, busca-se atender as funções desejadas de gerenciamento das fontes de energia em um veículo movido a hidrogênio e compensação de potência reativa para ampliar a região de operação de um motor de indução com potência constante.

É importante ressaltar que essa topologia foi denominada “topologia mínima” pois ela pode ser ampliada acrescentando submódulos, tanto capacitivos quanto com fonte de potência ativa, para implementar outras funções ao conversor e melhorar sua eficiência.

3.3. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Um diagrama do controle proposto para o acionamento do motor de indução usando a topologia mínima descrita na seção anterior é mostrado de forma simplificada na Figura 3.7.

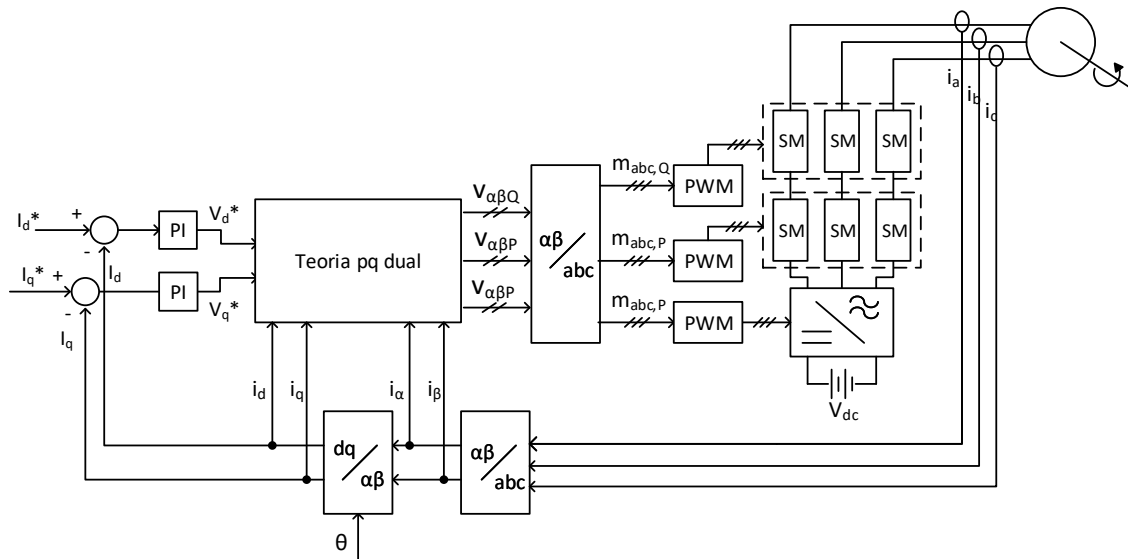


Figura 3.7: Diagrama de Controle.

Nesta figura é omitida a malha de controle externo da velocidade da máquina para dar ênfase à malha interna de controle da corrente. Os valores de referência das componentes I_d^* e I_q^* da corrente, assim como o ângulo θ , são calculados por essa malha externa que pode ser a aplicação de qualquer técnica de controle da velocidade de um motor de indução baseada em controle realimentado da corrente.

As medidas das correntes em cada fase na saída do conversor são convertidas em duas etapas nas componentes $\alpha\beta$ e dq e ambas alimentam o bloco que calcula as diferentes componentes das tensões a serem sintetizadas pelo conversor, com base na teoria pq dual. As componentes dq da corrente são ao mesmo tempo comparadas com suas referências e o erro produzido é tratado por um controlador PI que fornece as componentes dq da tensão de referência para o conversor.

De posse dos valores de corrente e tensão, usando a teoria pq dual, são produzidas as tensões de referência em $\alpha\beta$ para cada um dos níveis do conversor. Estas componentes de tensão são então transformadas nos sinais de modulação abc .

3.3.1. SEPARAÇÃO DAS POTÊNCIAS REAL E IMAGINÁRIA

Para separar as parcelas de tensão referentes à potência ativa e reativa que serão enviadas aos devidos submódulos, é proposta uma mudança do referencial dq para o referencial PQ em fase com a corrente do estator como mostra a Figura 3.8.

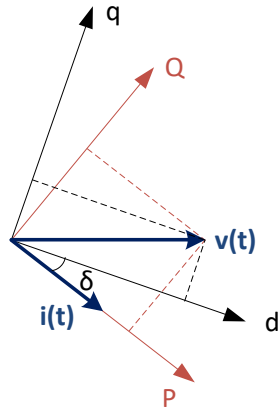


Figura 3.8: Eixos referenciais dq e PQ.

A diferença de fase entre os referenciais é calculada por:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{i_q}{i_d} \right). \quad (11)$$

As componentes da tensão no referencial dq são conhecidas e então se pode calcular a decomposição da tensão em PQ pela equação:

$$\vec{v}_{PQ} = \vec{v}_{dq} e^{-j\delta}, \quad (12)$$

ou, escrevendo na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \vec{v}_P \\ \vec{v}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v}_d \\ \vec{v}_q \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Para então calcular as componentes abc destas tensões PQ, seria necessário transformá-las em $\alpha\beta$ e depois aplicar a transformada inversa de Clarke [66]. Os três referenciais são mostrados na Figura 3.9. O ângulo θ é dado pelo controle vetorial da máquina de indução (controle orientado pelo campo).

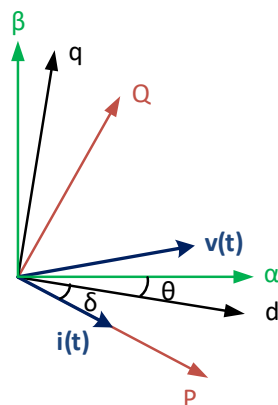


Figura 3.9: Eixos de referência dq, $\alpha\beta$ e PQ.

Observando a figura, podem-se escrever as equações:

$$\vec{v}_{\alpha,P} = \vec{v}_P \cos(\delta + \theta), \quad (14)$$

$$\vec{v}_{\beta,P} = \vec{v}_P \sin(\delta + \theta), \quad (15)$$

$$\vec{v}_{\alpha,Q} = \vec{v}_Q \cos(\delta + \theta), \quad (16)$$

$$\vec{v}_{\beta,Q} = \vec{v}_Q \sin(\delta + \theta). \quad (17)$$

E então, as componentes abc serão:

$$\begin{bmatrix} \vec{v}_{a,P} \\ \vec{v}_{b,P} \\ \vec{v}_{c,P} \end{bmatrix} = [C]^{-1} \begin{bmatrix} \vec{v}_{\alpha,P} \\ \vec{v}_{\beta,P} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{v}_{a,Q} \\ \vec{v}_{b,Q} \\ \vec{v}_{c,Q} \end{bmatrix} = [C]^{-1} \begin{bmatrix} \vec{v}_{\alpha,Q} \\ \vec{v}_{\beta,Q} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

onde $[C]^{-1}$ é a transformada inversa de Clarke.

Teoria pq dual

Outra forma de calcular essa decomposição das tensões é utilizando o dual da Teoria pq [67]. Assumindo que as potências real e imaginária³ são as mesmas em qualquer referencial, estas podem ser calculadas a partir das tensões e correntes no referencial dq como seguem:

$$p = v_d i_d + v_q i_q, \quad (20)$$

$$q = v_q i_d - v_d i_q. \quad (21)$$

Conhecidas as correntes no referencial $\alpha\beta$, as componentes de tensão usando a teoria pq dual são dadas por:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Separando as partes real e imaginária, tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha,P} \\ v_{\beta,P} \end{bmatrix} = \frac{p}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha,Q} \\ v_{\beta,Q} \end{bmatrix} = \frac{q}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} -i_\beta \\ i_\alpha \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Basta então aplicar a transformada inversa de Clarke como mostrado em (12) e (13) para calcular as componentes abc sem a necessidade de operações trigonométricas que aumentam esforço de programação.

³ Na teoria pq as potências real e imaginária são equivalentes à potência ativa e reativa da teoria clássica das potências.

Estas tensões de referência produzidas são, numa análise mais global, o índice de modulação imposto ao conversor. Assim, é importante notar que esta separação direta é válida quando o nível de tensão dos conversores em questão é igual. Se por acaso eles forem diferentes, é necessário multiplicar o valor encontrado por uma parcela que é a razão inversa das tensões. Por exemplo, se o nível da tensão nos capacitores dos submódulos é a metade da tensão da bateria que alimenta o VSI, o índice de modulação para o conversor que fornece a parcela de potência reativa deve ser multiplicado por 2. E se isto acarretar em sobremodulação, será necessário aumentar a referência de tensão dos capacitores para mitigar o problema.

Valor médio e oscilante da potência real

Esse processo ainda pode ser expandido separando a potência real p em suas parcelas média \bar{p} e oscilante \tilde{p} . No geral, pela teoria pq, o que difere um valor médio de um valor oscilante é a sua frequência. Denomina-se então como potência média aquela que possui baixa frequência e a diferença entre o valor total de potência e o valor médio é a sua parcela oscilante. Assim:

$$p = \bar{p} + \tilde{p}. \quad (25)$$

Logo, a equação (17) pode ser reescrita separando estas duas parcelas:

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha,P} \\ v_{\beta,P} \end{bmatrix} = \frac{\bar{p}}{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \frac{\tilde{p}}{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

E ficam então definidas as tensões nas coordenadas $\alpha\beta$ para cada uma das parcelas como:

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha,\bar{p}} \\ v_{\beta,\bar{p}} \end{bmatrix} = \frac{\bar{p}}{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha,\tilde{p}} \\ v_{\beta,\tilde{p}} \end{bmatrix} = \frac{\tilde{p}}{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Mais uma vez, as componentes abc são calculadas pela transformada inversa de Clarke como em (12) agora para cada uma das parcelas de potência real.

Desta forma é possível gerenciar o fornecimento de energia para que, em um veículo movido a hidrogênio, um empilhamento de células a combustível forneça a parcela de potência real média, já que esta não responde bem às rápidas variações de potência, e a bateria forneça a parcela de potência real oscilante.

Diversos trabalhos são apresentados na literatura com técnicas para gerenciar este fornecimento de energia entre as diversas fontes presentes em um veículo movido a

hidrogênio. Uma malha de controle mais externa deve ser acrescentada ao circuito para a definição destes valores, contudo isto não faz parte do escopo desta dissertação.

3.3.2. CONTROLE DA TENSÃO NOS SUBMÓDULOS CAPACITIVOS

Os submódulos capacitivos são responsáveis no sistema por fornecer toda a parcela de potência imaginária ou reativa. Porém, para que os capacitores possam ser carregados e para manter sua tensão regulada é necessário adicionar uma parcela de potência real às suas moduladoras [68].

Assim, o controle da tensão nos capacitores é feito conforme o diagrama de blocos da Figura 3.10.

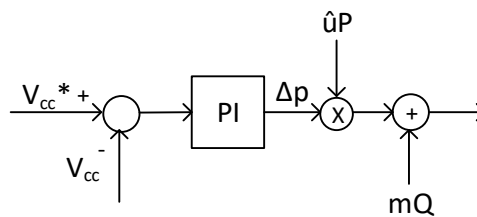


Figura 3.10: Diagrama de controle dos capacitores.

A tensão de referência e o valor medido da tensão no capacitor são comparados e o erro é tratado em um controlador do tipo proporcional e integral. A saída deste controlador é o valor da variação de parcela de potência ativa Δp que deve ser acrescentada à moduladora da potência reativa.

Para garantir que este valor é proporcional a uma potência ativa, ele é multiplicado por um vetor unitário \hat{u}_P em fase com a corrente da fase onde está o submódulo, conforme mostrado na Figura 3.11. A soma desta parcela de potência ativa com a moduladora de potência reativa calculada anteriormente é a referência para a modulação PWM dos submódulos capacitivos.

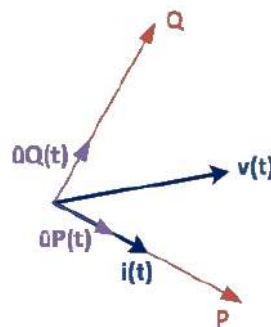


Figura 3.11: Vetor unitário para controle da tensão nos capacitores.

O vetor unitário é calculado de forma análoga à equação (12):

$$\begin{bmatrix} \vec{u}_{a,P} \\ \vec{u}_{b,P} \\ \vec{u}_{c,P} \end{bmatrix} = [C]^{-1} \begin{bmatrix} \vec{u}_{\alpha,P} \\ \vec{u}_{\beta,P} \end{bmatrix},$$

onde $\vec{u}_{\alpha,P} = \frac{\vec{v}_{\alpha,P}}{|\vec{v}_P|}$ e $\vec{u}_{\beta,P} = \frac{\vec{v}_{\beta,P}}{|\vec{v}_P|}$.

E o módulo $|\vec{v}_P|$ é dado por:

$$|\vec{v}_P| = \sqrt{v_{\alpha,P}^2 + v_{\beta,P}^2}.$$

Esta forma de se calcular o vetor unitário não é eficaz se a carga se torna puramente indutiva, pois a parcela de potência ativa é nula. No caso de um motor de indução, isto pode ocorrer quando a velocidade de operação é baixa, pois sua corrente de magnetização é alta. Logo, a melhor maneira de calcular o vetor unitário ainda é a partir do ângulo θ calculado pelo controle vetorial diretamente ou usando um PLL.

4. SIMULAÇÕES E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Para validar o sistema e o controle propostos, algumas simulações foram realizadas utilizando o *software* PSIM. Um sistema mínimo com um VSI e dois submódulos conectados em série em cada fase, um capacitivo e um alimentado por uma fonte de potência ativa, foi usado para mostrar a separação das potências.

Numa etapa seguinte, um modelo de empilhamento de células a combustível foi reproduzido e acrescentado ao sistema levando em consideração todas as suas não linearidades eletroquímicas e termodinâmicas.

O sistema foi posteriormente reduzido para um VSI e um submódulo capacitivo para validar a separação da potência associada ao controle orientado pelo campo (vetorial) de um motor de indução. Nesta etapa, a célula a combustível que era conectada ao VSI foi novamente representada apenas por uma fonte ideal, uma vez que a separação das parcelas média e oscilante de potência real já havia sido validada.

Neste capítulo serão detalhadas as simulações feitas e os resultados obtidos serão apresentados.

4.1. SEPARAÇÃO DAS POTÊNCIAS

Esta primeira simulação realizada tem o objetivo de validar o controle proposto para a separação das potências e para tanto será utilizado o sistema mínimo que foi discutido no capítulo anterior.

A carga alimentada em todas as etapas é representada por um motor de indução do tipo gaiola de esquilo com potência e tensão reduzidas. Os parâmetros da máquina, apresentados na Tabela 4-1, baseiam-se em [69]. A Figura 4.1 mostra a carga como foi modelada no PSIM.

Tabela 4-1: Parâmetros dos enrolamentos da máquina de indução simulada.

R_s (Ω)	L_s (mH)	R_r (Ω)	L_r (mH)	L_m (mH)
2,00	74,24	1,43	74,24	71,91

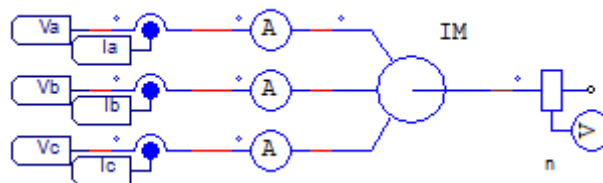


Figura 4.1: Representação do Motor de Indução no PSIM.

Como o objetivo principal desta primeira simulação é validar o conceito da separação de potências, apenas o controle da corrente é feito e as fontes de potência ativa, baterias e células a combustível, são representadas como fontes ideais. Outra aproximação foi manter fixo o valor de referência para a potência média, isto significa que não é realizado nenhum controle secundário para otimizar o gerenciamento das potências entre as fontes. A referência para a potência oscilante é dada pela diferença entre a potência ativa calculada e o valor médio estipulado.

4.1.1. SISTEMA MÍNIMO

A topologia do sistema mínimo mostrada no capítulo 3 foi representada no PSIM, como mostra o diagrama da Figura 4.2. Um VSI alimentado por uma fonte de tensão ideal, representando a conexão do empilhamento de células a combustível, recebe em cada fase dois submódulos conectados em série, um deles com fonte de energia e outro contendo apenas capacitância no lado CC. Os submódulos são representados por subcircuitos.

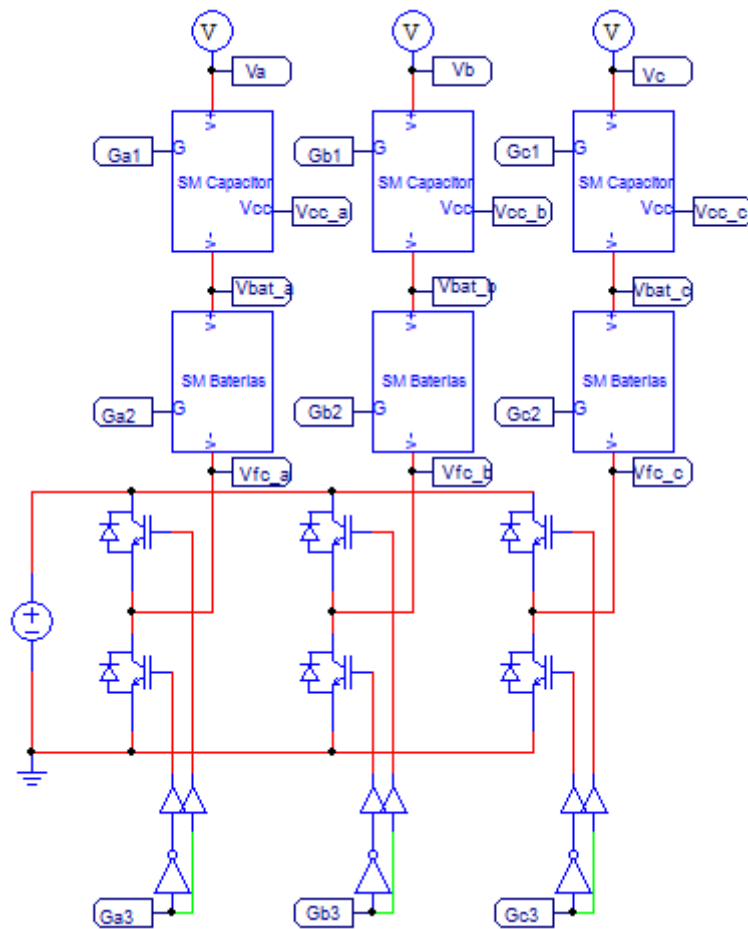


Figura 4.2: Topologia do Sistema Mínimo Simulado.

O primeiro subcircuito é mostrado na Figura 4.3 e é constituído de um circuito de meia ponte alimentado por uma fonte de tensão ideal, sendo capaz de suprir potência ativa. Este subcircuito tem a função de fornecer a parcela oscilante da potência real.

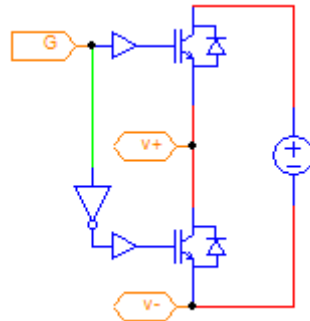


Figura 4.3: Subcircuito com Meia Ponte Alimentada por uma Fonte Ideal.

O segundo subcircuito possui um circuito de meia ponte alimentado por um capacitor, como mostra a Figura 4.4. Este subcircuito tem a função de fornecer a totalidade da potência imaginária.

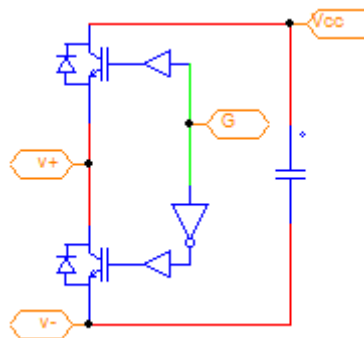


Figura 4.4: Subcircuito com Meia Ponte Alimentada por um Capacitor.

Os terminais V_a , V_b e V_c são conectados ao motor mostrado na Figura 4.1.

4.1.2. CARGA DOS CAPACITORES

Antes de realizar a separação das potências, é necessário carregar os capacitores dos submódulos para que estes operem corretamente com a tensão determinada. A carga e o controle de tensão são realizados como mostrado na seção 3.3.2.

A Figura 4.5 mostra o transitório da tensão CC no submódulo capacitivo da fase A, sendo seu valor médio de regime permanente igual a 10V.

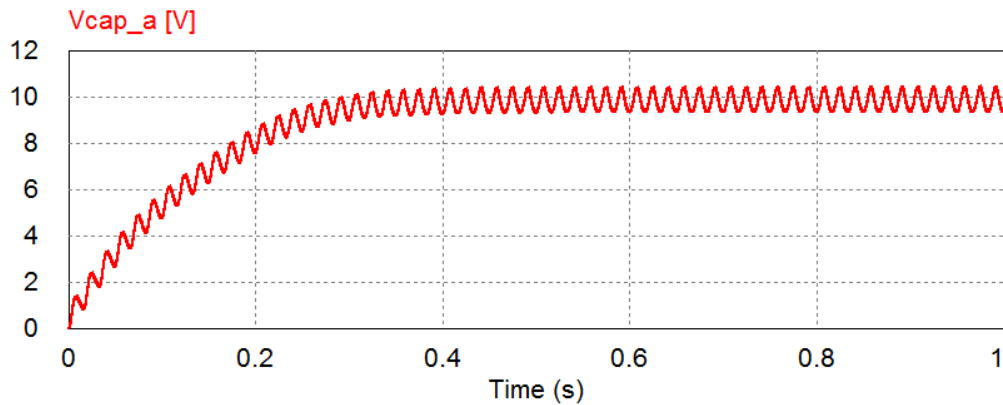


Figura 4.5: Carga e Controle da Tensão nos Capacitores.

O início da separação das potências se dá por volta de $t = 0,3$ s da simulação e não afeta diretamente o controle da tensão nos capacitores.

4.1.3. CORRENTES NO ESTATOR

O controle da corrente é feito para manter uma frequência constante de 60Hz e amplitude de 4 A, que equivale aproximadamente ao valor rms nominal do motor utilizado.

Este valor é atingido rapidamente, em menos de um ciclo da corrente, como mostra a Figura 4.6. Vale ressaltar que no intervalo de tempo da figura mostrada, o controle pela separação das potências ainda não está sendo executado.

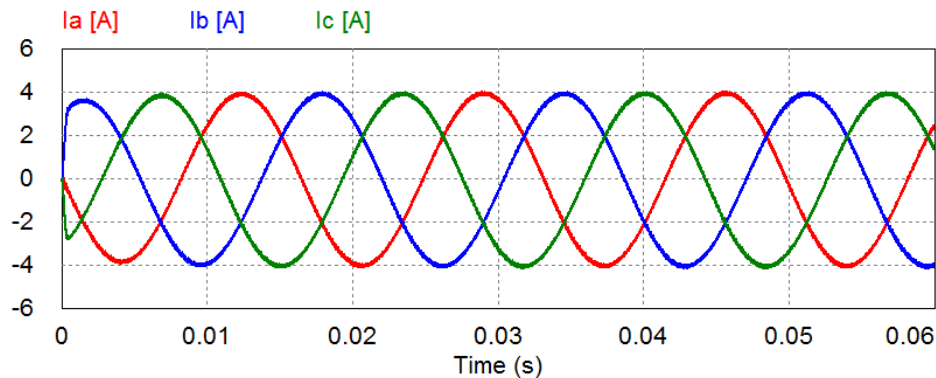


Figura 4.6: Transitório da Corrente do Estator.

A Figura 4.7 mostra o intervalo de tempo em que a separação das potências é iniciada, de acordo com a carga do capacitor. É possível notar que nenhuma alteração ocorre nas correntes do motor.

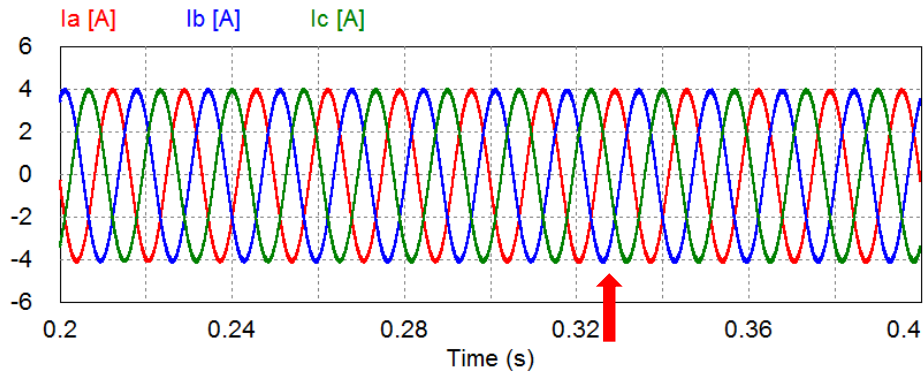


Figura 4.7: Correntes no Estator na Separação das Potências.

4.1.4. SINAIS DE MODULAÇÃO

Quando a tensão nos capacitores atinge 95% do valor estipulado, aproximadamente em $t = 0,3$ s, inicia-se a separação das potências para cada uma das fontes. Antes disto, apenas os submódulos com fonte de tensão são modulados para produzir toda a potência demandada pela carga, tanto ativa como reativa.

A Figura 4.8 mostra os sinais de modulação da fase A em comparação com a corrente nesta mesma fase que foi dividida por um fator 8 para que ficasse na mesma escala das moduladoras.

As variáveis $maPm$, $maPd$ and maQ se referem às moduladoras do VSI, dos submódulos de potência ativa e dos submódulos capacitivos, respectivamente. Pode-se notar que, antes da separação das potências o sinal de modulação dos submódulos de potência ativa é defasado da corrente, sendo responsável por fornecer toda a potência demandada. Após a separação, os sinais de modulação Pm e Pd ficam em fase com a corrente e suas amplitudes se diferenciam conforme foi dito na seção 4.1. O sinal Q é adiantado 90° em relação à corrente e sua amplitude é tal que forneça toda a potência reativa demandada pelo motor.

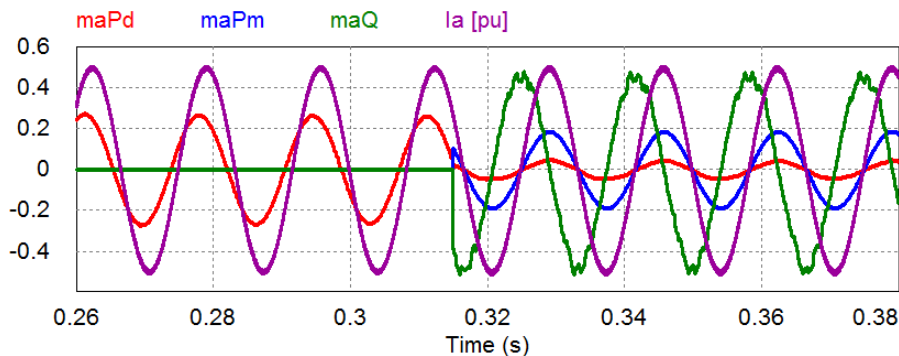


Figura 4.8: Sinais de Modulação.

4.2. COMPORTAMENTO DINÂMICO DO EMPILHAMENTO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

É possível encontrar na literatura diversos modelos de empilhamento de células a combustível. Em [35] é feita uma análise detalhada dos diferentes tipos de modelos já estudados. Os três modelos utilizados para compor a simulação deste trabalho foram publicados por CORRÊA *et al.* [70], LIMA *et al.* [71] e WANG *et al.* [72], sendo os dois primeiros adaptações de um modelo originalmente proposto por MANN *et al.* [73] e AMPHLETT *et al.* [74],[75]. Os três autores trabalham com o mesmo empilhamento do tipo PEM SR-12 de 500W da empresa Avista Labs. LIMA *et al.* faz uma abordagem dinâmica e desenvolve seu modelo no PSIM, já WANG *et al.* adota um modelo de circuito elétrico utilizando o PSPICE.

O circuito do PSIM que simula um empilhamento de CaCs, mostrado na Figura 4.9, se resume a uma fonte de tensão controlada, a qual é associada a um bloco de programação C, e um circuito equivalente dos efeitos térmicos.

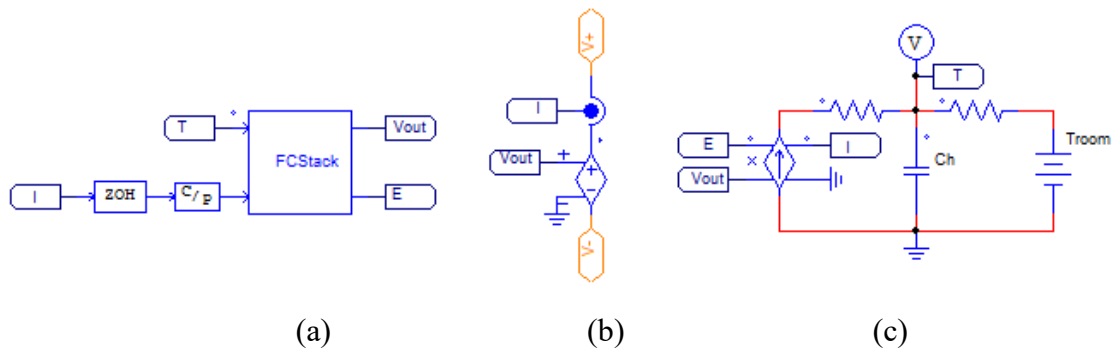


Figura 4.9 Modelo de simulação do empilhamento de células a combustível: (a) Bloco de programação C, (b) Fonte de tensão controlada e (c) Circuito equivalente dos efeitos térmicos.

A seguir serão mostradas as equações para cada potencial envolvido, que foram escritas em código C, formando a tensão de saída do empilhamento e o detalhamento do circuito equivalente da parte termodinâmica.

4.2.1. POTENCIAL DE NERNST

Como foi mostrado no capítulo 2, o potencial de Nernst é o potencial interno da CaC disponível devido à reação eletroquímica da oxidação do hidrogênio e da redução do oxigênio.

No modelo elétrico de WANG *et al.*, o potencial de Nernst é representado por uma fonte de tensão ideal E_0 , que representa o potencial reversível nas condições

padrões de temperatura e pressão (298 K e 1 atm, respectivamente), e duas fontes de tensão controladas, como mostra a Figura 4.10.

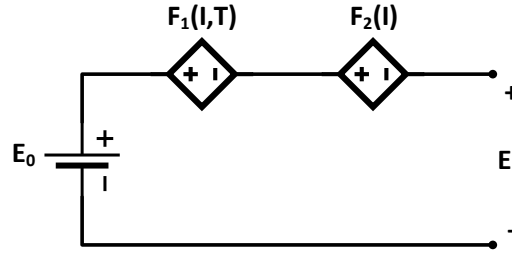


Figura 4.10: Representação do potencial de Nernst na forma de circuito segundo [72].

As duas fontes de tensão controladas representam a influência da corrente e da temperatura no potencial interno de um empilhamento. A primeira delas é regida por (3) mostrada na seção 2:

$$f_1(I, T) = -\frac{N_{cell}RT}{2F} \ln \left[p_{H_2} (p_{O_2})^{0,5} \right] + N_{cell}k_E(T - 298). \quad (29)$$

A segunda fonte de tensão, no domínio de Laplace, é dada por:

$$f_2(I) = N_{cell}\lambda_e I(s) \frac{\tau_e s}{\tau_e s + 1}, \quad (30)$$

que representa o efeito transitório de queda de tensão devido ao atraso no transporte de massa quando há uma variação na corrente do empilhamento.

O modelo dinâmico de CORRÊA *et al.* é feito apenas pela equação (29) e não inclui a segunda fonte de tensão.

4.2.2. SOBREPOTENCIAL DE ATIVAÇÃO

Pelo modelo de WANG *et al.*, a queda de tensão por ativação do empilhamento de células a combustível pode ser dividida em duas partes: a primeira delas representada por uma fonte de tensão ideal em série com uma fonte de tensão controlada por temperatura; a segunda representada por resistências não lineares que dependem da temperatura e também da corrente.

A equação empírica que representa o potencial de ativação é dada por:

$$V_{act} = \eta_0 + (T - 298)a + Tb \ln(I). \quad (31)$$

Assim, η_0 é representado pela fonte ideal, a parcela $(T - 298)a$ é representada pela fonte de tensão controlada e a terceira parcela da equação (3) é dividida em 3 resistências não lineares.

Nesta etapa, CORRÊA *et al.* e MANN *et al.* escrevem a equação referente ao potencial de ativação como:

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(C_{O_2}) + \xi_4 T \ln(I)], \quad (32)$$

onde I é a corrente de operação da CaC, C_{O_2} é a concentração de oxigênio na interface do catodo e os ξ 's são parâmetros para cada CaC calculados com base em equações cinéticas, termodinâmicas e eletroquímicas. Estes parâmetros foram calculados por CORRÊA *et al.* e são mostrados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Parâmetros do sobrepotencial de ativação.

Parâmetro	Valor
ξ_1	-0,948
ξ_2	$0,00286 + 0,0002 \ln(A) + 4,3 \cdot 10^{-5} \ln(C_{H_2})$
ξ_3	$7,22 \cdot 10^{-5}$
ξ_4	$-1,0615 \cdot 10^{-4}$

Como os dados que WANG *et al.* fornecem para as resistências não lineares são inconsistentes, a partir desta etapa, será adotado o modelo de CORRÊA *et al.* e LIMA *et al.* para o cálculo dos sobrepotenciais de ativação, ôhmico e de concentração.

4.2.3. SOBREPOTENCIAL ÔHMICO (OU PERDAS ÔHMICAS)

A parcela de perdas resistivas, ou queda de tensão ôhmica, citada na seção 2 é expressa por:

$$V_{ohm} = I(R_{ohm} + R_c), \quad (33)$$

onde R_c representa a soma das resistências eletrônicas e de contato, consideradas constantes, e R_{ohm} é a resistência à transferência de prótons dada por:

$$R_{ohm} = \frac{\rho_M l}{A}, \quad (34)$$

onde l é a espessura da membrana, A é a área ativa da CaC unitária e ρ_M é a resistividade específica da membrana, que é função da densidade de corrente na CaC, da temperatura e do conteúdo de água na membrana.

4.2.4. SOBREPOTENCIAL DE CONCENTRAÇÃO

O efeito causado pelo transporte de massa na CaC é determinado, segundo CORRÊA *et al.*, pela equação:

$$V_{conc} = -B \ln\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right), \quad (35)$$

onde J é a densidade de corrente de operação da CaC, J_{max} é a máxima densidade de corrente suportada pela CaC e B é um parâmetro que depende da CaC e seu estado de operação.

4.2.5. REPRESENTAÇÃO ELÉTRICA DOS EFEITOS TÉRMICOS

O circuito da Figura 4.11 representa o equivalente elétrico dos efeitos térmicos do empilhamento de células a combustível segundo WANG *et al.* A potência consumida nos circuitos de ativação, ôhmico e de concentração é considerada a fonte de calor que faz com que a temperatura aumente e é representada pela fonte de corrente controlada.

Há ainda uma resistência térmica devido à convecção do ar e a fonte de tensão constante T_{room} representa a temperatura ambiente. A tensão medida no capacitor central representa a variação da temperatura no empilhamento.

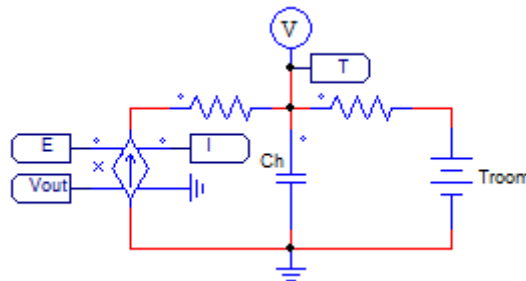


Figura 4.11: Circuito Equivalente dos Efeitos Térmicos.

4.2.6. CURVAS DE POLARIZAÇÃO E TEMPERATURA

A curva de polarização da Figura 4.12 mostra as três regiões características de um empilhamento de CaC. Para baixas correntes, é observada a não linearidade causada pelo potencial de ativação, a região central que corresponde à queda de tensão linear ou potencial ôhmico e para altas correntes o efeito não linear da queda de tensão por concentração.

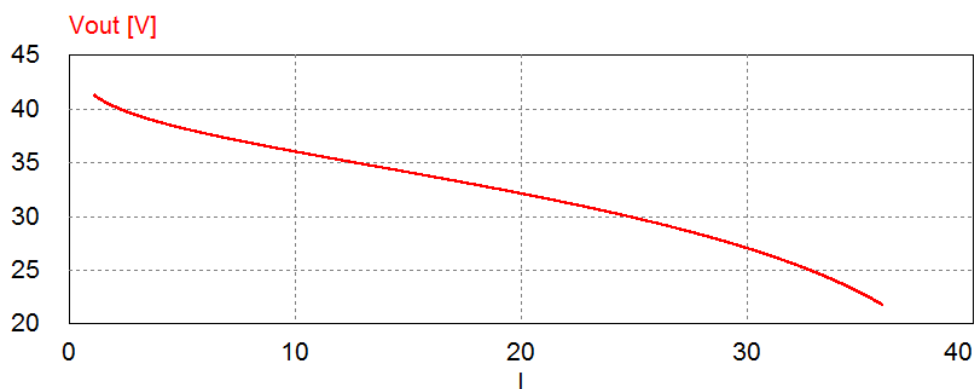


Figura 4.12: Curva de polarização obtida via simulação.

A variação da temperatura para o intervalo de tempo simulado é mostrada na Figura 4.13.

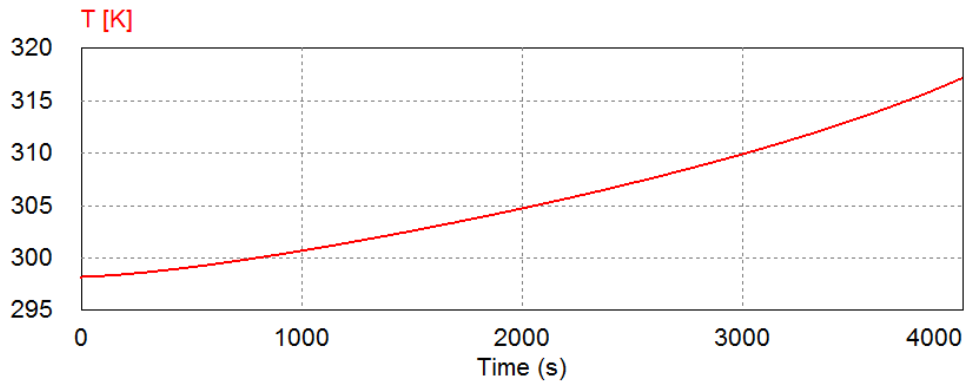


Figura 4.13: Variação da temperatura da CaC obtida via simulação.

4.3. CONTROLE DE CORRENTE COM CAC

O modelo de empilhamento de CaCs simulado na seção anterior foi então utilizado como fonte de tensão do VSI para uma simulação de controle da corrente como feita na seção 4.1. A Figura 4.14 mostra o circuito completo com o empilhamento.

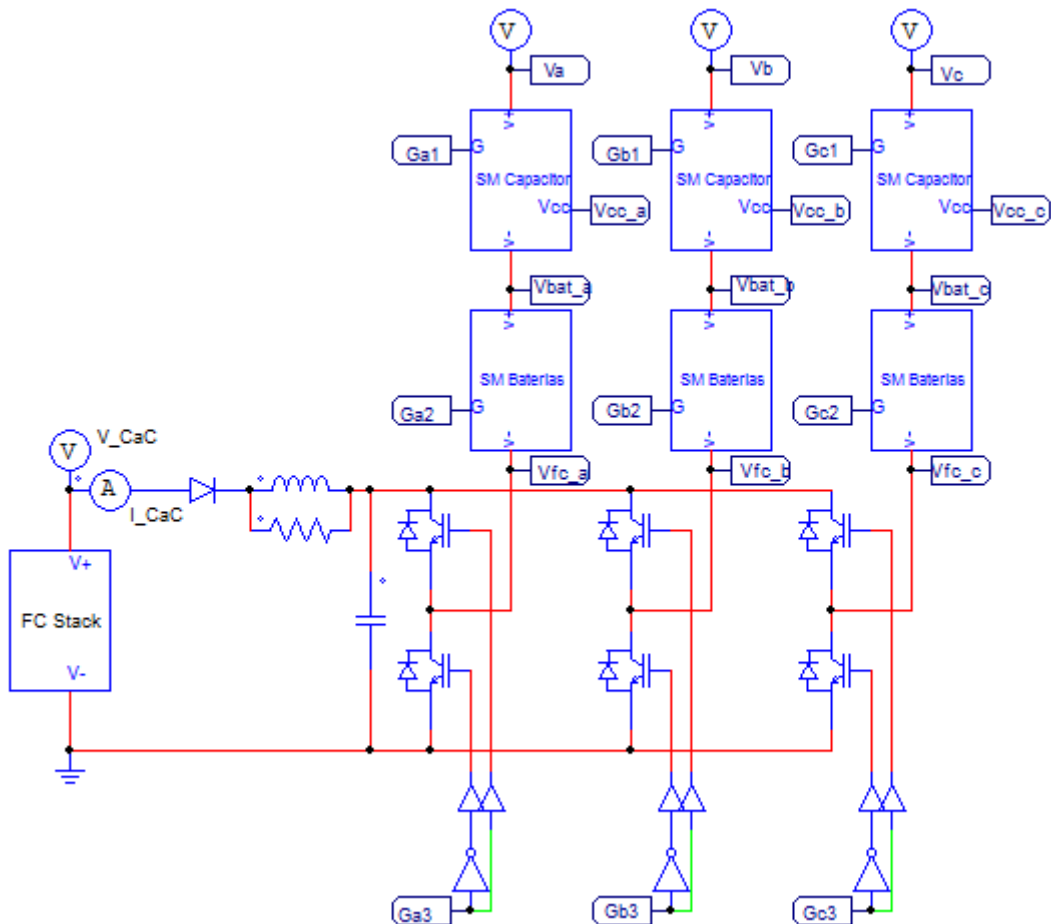


Figura 4.14: Circuito para Controle de Corrente com a CaC.

Foram incluídos, na interface entre o empilhamento e o VSI, um diodo para impedir a circulação de corrente reversa e um filtro passa-baixas passivo de segunda ordem para garantir que a corrente e a tensão nos terminais da CaC não oscilem.

Como a potência nominal do modelo obtido de [70] para simulação do empilhamento de CaCs é cerca de dez vezes maior que a potência nominal do modelo do motor obtido de [69], a corrente fornecida pelo empilhamento a esse motor seria muito baixa e seu ponto de operação estaria fora da região limite. Por esse motivo, os parâmetros da máquina foram reajustados de modo que a potência resultante fosse equivalente a 20 máquinas operando em paralelo. Os novos parâmetros do motor são mostrados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Novos parâmetros para a máquina de indução simulada.

R_s (Ω)	L_s (mH)	R_r (Ω)	L_r (mH)	L_m (mH)
0,100	3,712	0,072	3,712	3,595

Os dados obtidos para as correntes da carga no intervalo de tempo onde se inicia o controle separado das potências são mostrados na Figura 4.15. A corrente agora possui um valor de 80A pico e há uma pequena variação no momento em que o controle da separação das potências é iniciado.

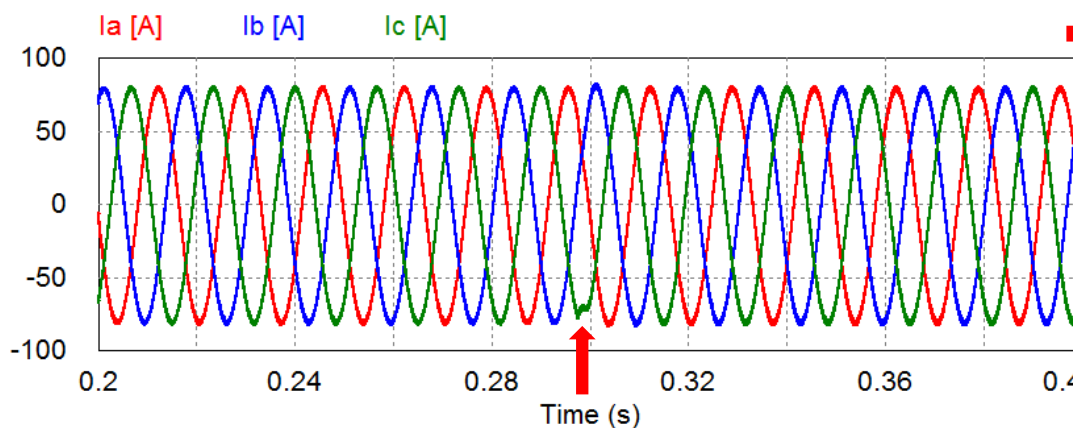


Figura 4.15: Correntes no motor com separação de potências e CaC.

A Figura 4.16 mostra os sinais de modulação produzidos quando se insere o modelo do empilhamento de CaCs no circuito.

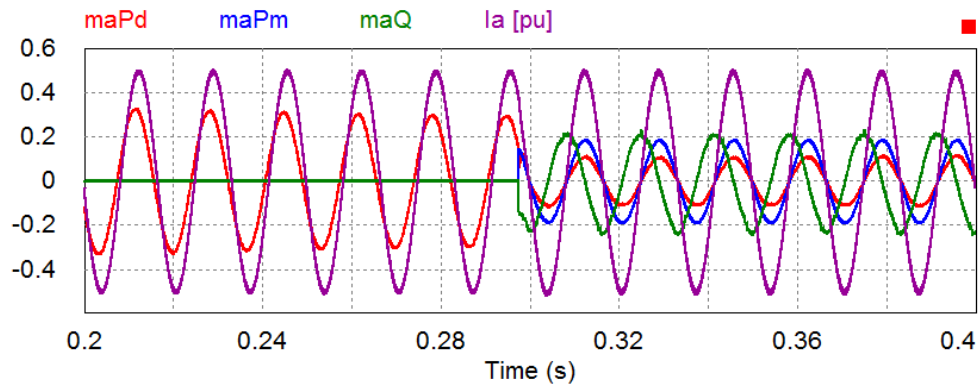


Figura 4.16: Sinais de modulação incluindo o circuito equivalente da CaC.

A corrente fornecida pelo empilhamento de células a combustível é mostrada na Figura 4.17. Seu valor inicial é nulo enquanto os capacitores estão sendo carregados e a partir do momento em que se inicia a separação de potências a CaC passa a fornecer cerca de 11A.

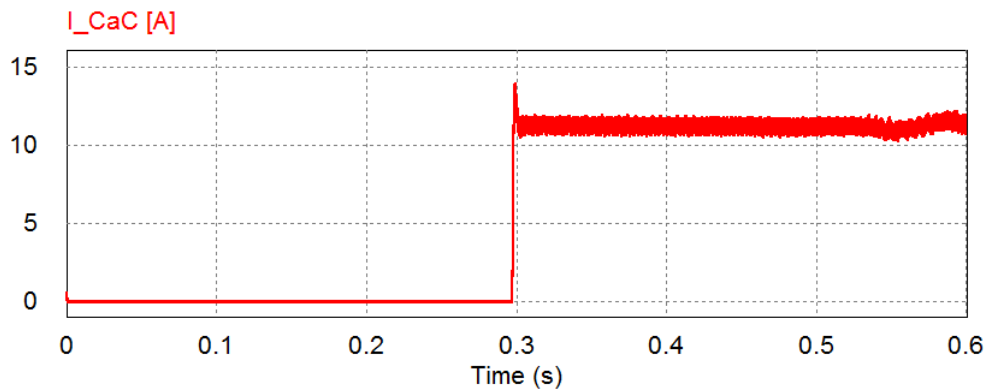


Figura 4.17: Corrente fornecida pelo empilhamento de células a combustível.

A tensão nos terminais do empilhamento de CaCs é mostrada na Figura 4.18. No momento em que se inicia o controle com a separação de potências, o seu valor tem uma queda de cerca de 6V.

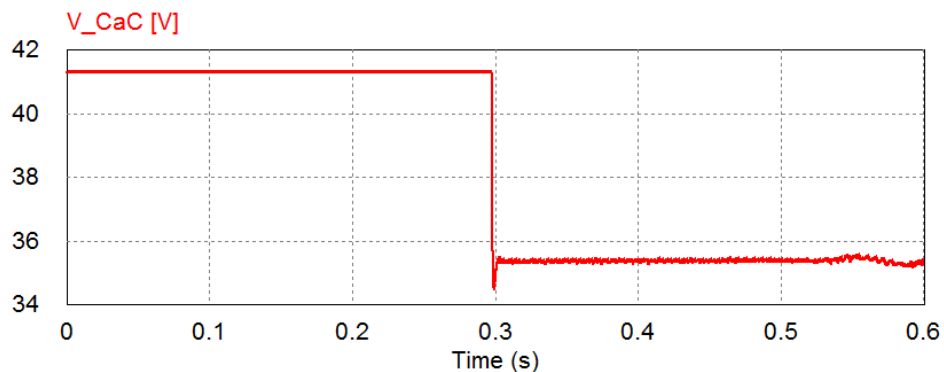


Figura 4.18: Tensão nos terminais do empilhamento de células a combustível.

A Figura 4.19 mostra a variação das potências ativas. Como não há nesta etapa controle da velocidade do motor, este tende a acelerar e assim a potência ativa segue aumentando. A potência das baterias, até que se inicie a separação das potências, supre tanto a aceleração como a carga dos capacitores e por isso é maior que a potência do motor. Quando o empilhamento de CaCs é incluído no sistema, a potência fornecida pelas bateria diminui.

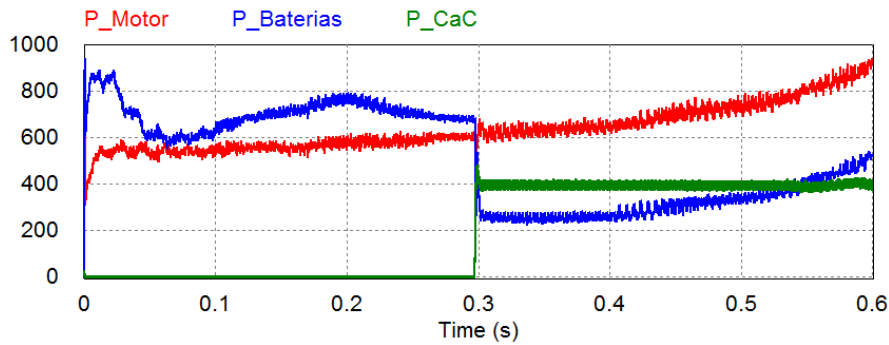


Figura 4.19: Potências demandada pelo motor e fornecida pelas baterias e empilhamento de CaCs.

4.4. CONTROLE DO MOTOR DE INDUÇÃO

Esta simulação foi realizada para demonstrar a operação da separação das potências com o controle de velocidade e torque do motor de indução. Como esta etapa é uma preparação para utilização de um protótipo (descrito na seção 4.5), o sistema foi reduzido por limitação de *hardware* e possui apenas o VSI e submódulos capacitivos. As Figura 4.20 e Figura 4.21 mostram o novo circuito utilizado nesta simulação. Foi acrescido à carga um *encoder* para medir a velocidade do motor.

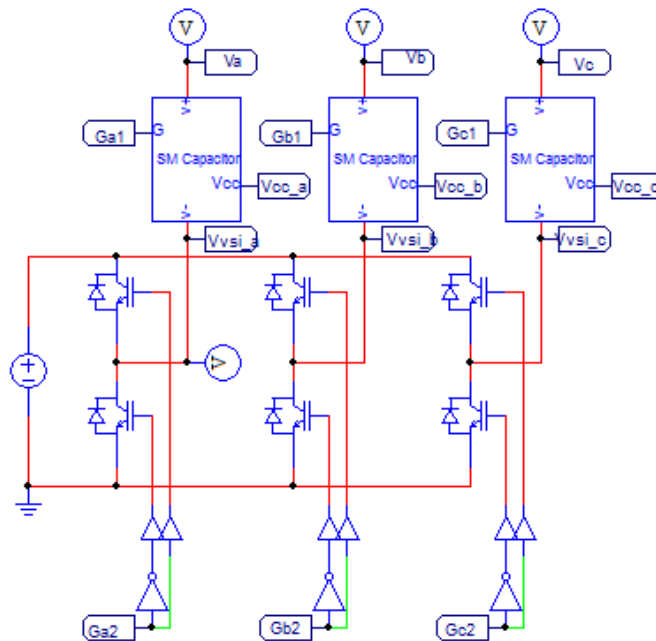


Figura 4.20: Circuito reduzido para controle de velocidade.

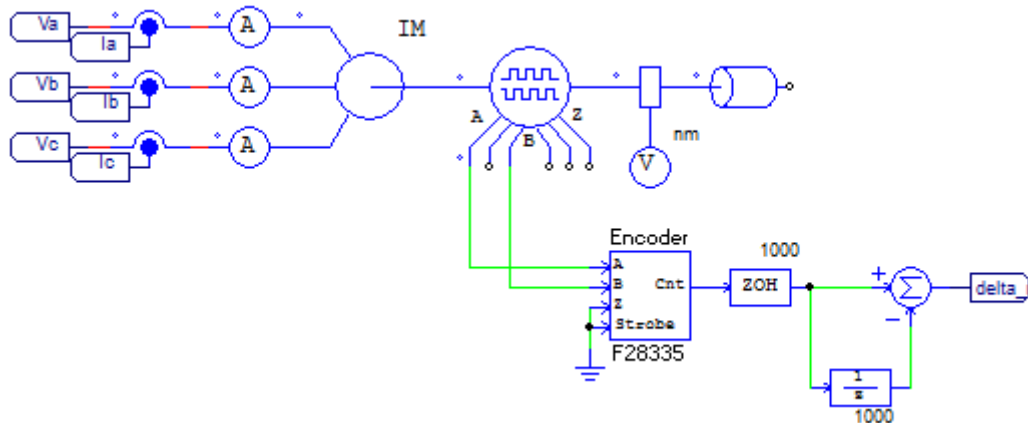


Figura 4.21: Encoder aplicado a carga para medição de posição e velocidade.

Nesta simulação, o motor é acionado após 0,1s e sua velocidade é controlada apenas pelo VSI com uma fonte de tensão ideal conectado em seu elo CC até atingir o valor de referência de 1800 rpm. Esta velocidade é alcançada por volta de 0,4s, como mostra a Figura 4.22.

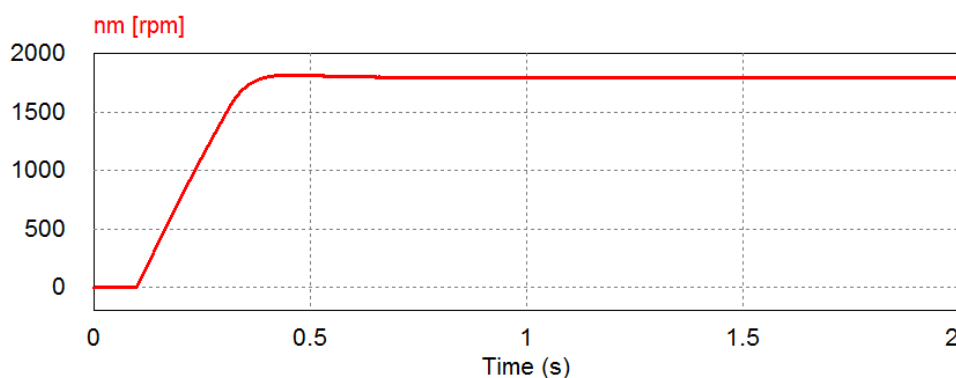


Figura 4.22: Velocidade do motor.

O torque desenvolvido pelo motor é máximo enquanto o motor está em aceleração, conforme a velocidade vai atingindo o regime permanente, o torque cai até o valor nominal, como pode ser visto na Figura 4.23.

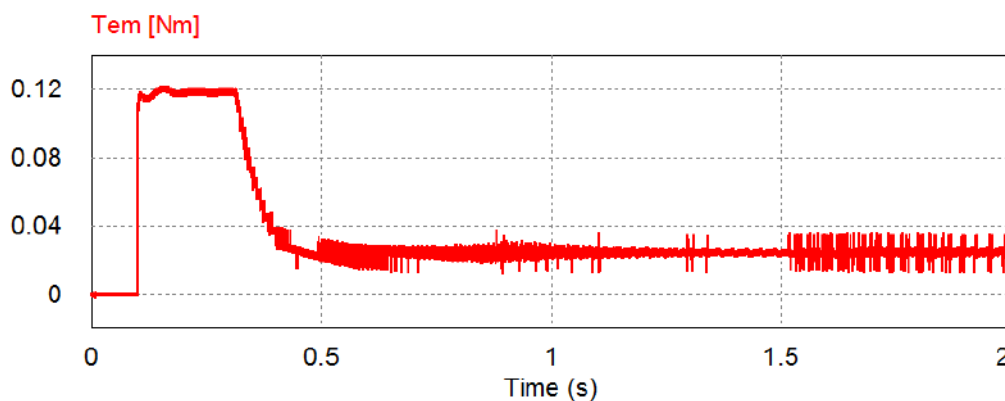


Figura 4.23: Torque produzido.

Assim que o motor atinge a velocidade de referência, o controle da tensão nos capacitores é iniciado, por volta de 0,5s. A Figura 4.24 mostra a tensão por unidade no capacitor do submódulo da fase A e dois sinais de modulação. A curva em azul é a moduladora de potência reativa na fase A, já a curva em vermelho representa o sinal de modulação de potência reativa acrescido da parcela de potência ativa necessária para carregar o capacitor e manter sua tensão regulada.

Até que o capacitor atinja 0,95 pu, apenas potência ativa é fornecida para que os capacitores sejam carregados. Após esse valor, em cerca de 1,6s, o controle separado das potências se inicia e os submódulos capacitivos passam a fornecer potência reativa à carga. É possível notar que não há nenhuma alteração na tensão do capacitor com a troca do controle.

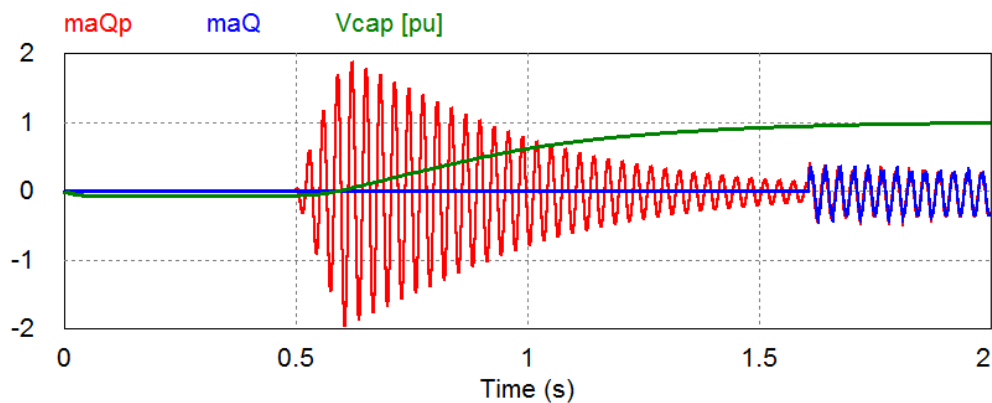


Figura 4.24: Tensão no capacitor do submódulo capacitivo da fase e seu sinal de modulação.

Uma aproximação nas curvas de modulação, Figura 4.25, mostra a parcela de potência ativa que é acrescida ao sinal de potência reativa para manter a tensão no capacitor.

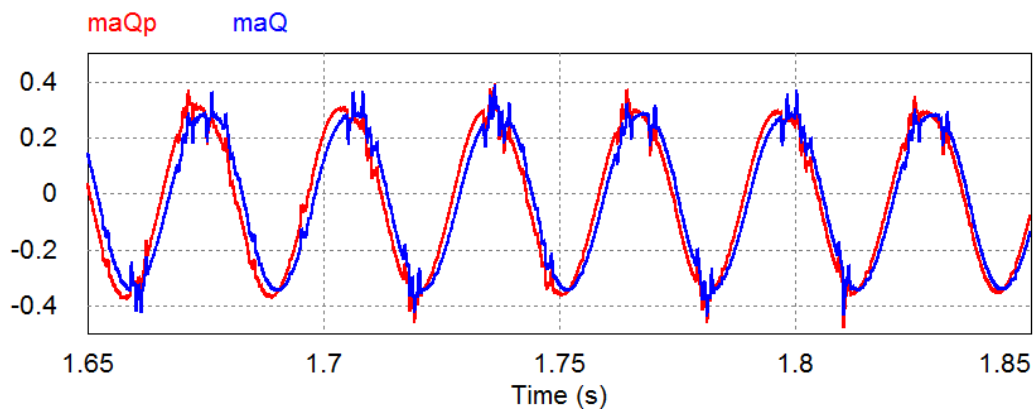


Figura 4.25: Moduladoras do submódulo capacitivo.

A corrente medida na fase A do motor é mostrada na Figura 4.26, assim como as componentes i_d e i_q . A componente i_d é mantida fixa em 1A e a componente i_q é proporcional ao torque. Algum ruído é observado e atribuído ao sinal do *encoder* e aparentemente a separação das parcelas de potência não afeta o valor da corrente e o controle de velocidade do motor.

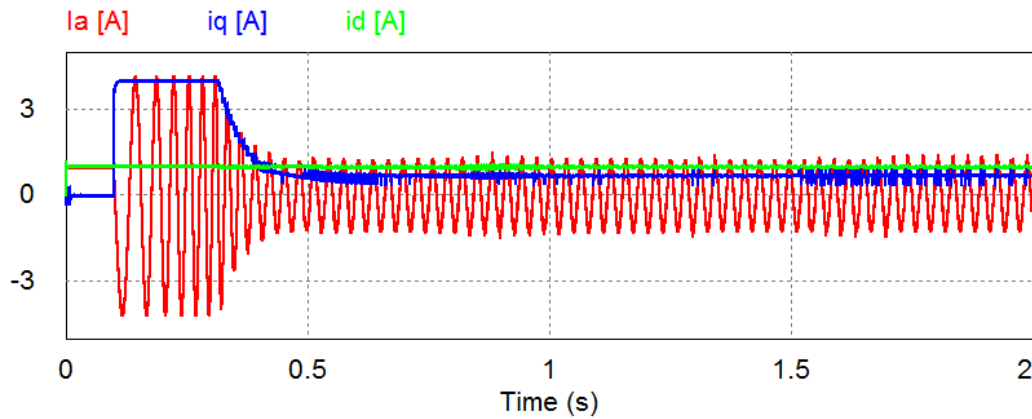


Figura 4.26: Componentes i_d e i_q das correntes do motor.

Foi aplicada então uma variação na referência de velocidade após o sistema estar operando com a separação de potência. A Figura 4.27 mostra a resposta da velocidade quando a referência é alterada.

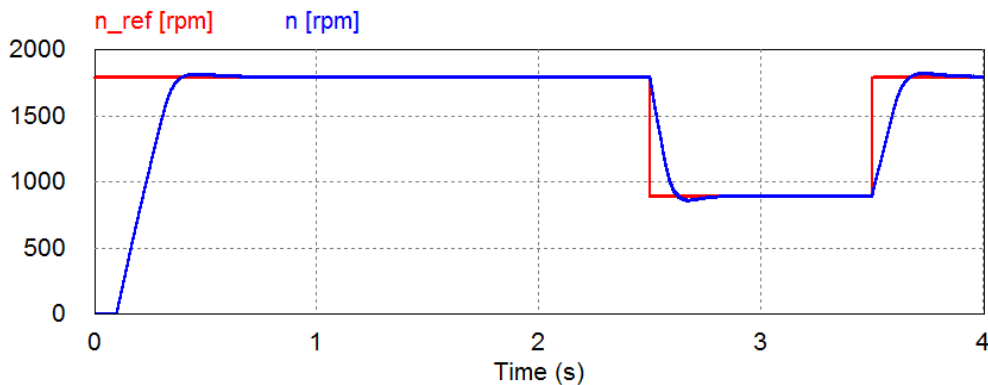


Figura 4.27: Variação de velocidade.

Na Figura 4.28 é mostrado o perfil de torque quando há essa variação de velocidade. O torque negativo sem alteração do sentido da rotação, pode-se dizer que o sistema é capaz de operar com frenagem regenerativa sendo a energia absorvida pelas baterias.

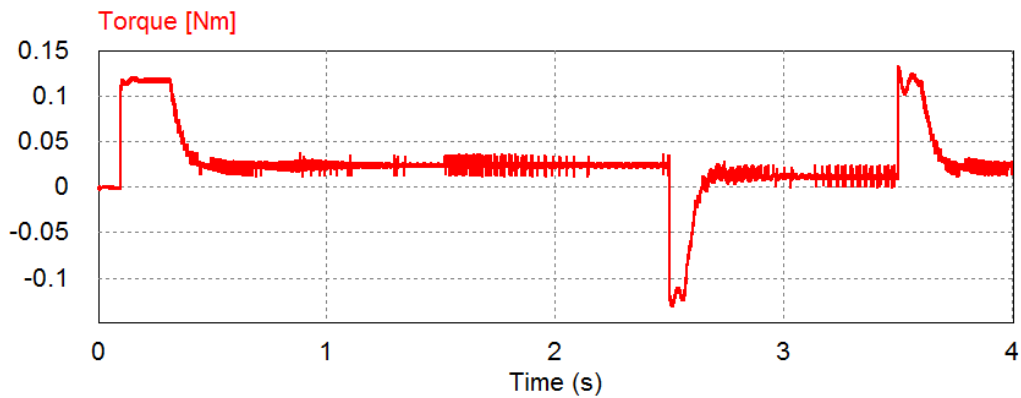


Figura 4.28: Perfil de torque para a variação da velocidade.

O perfil de corrente para essa situação é mostrado na Figura 4.29. Nota-se que a variação da velocidade se reflete em uma variação diretamente proporcional da frequência de operação.

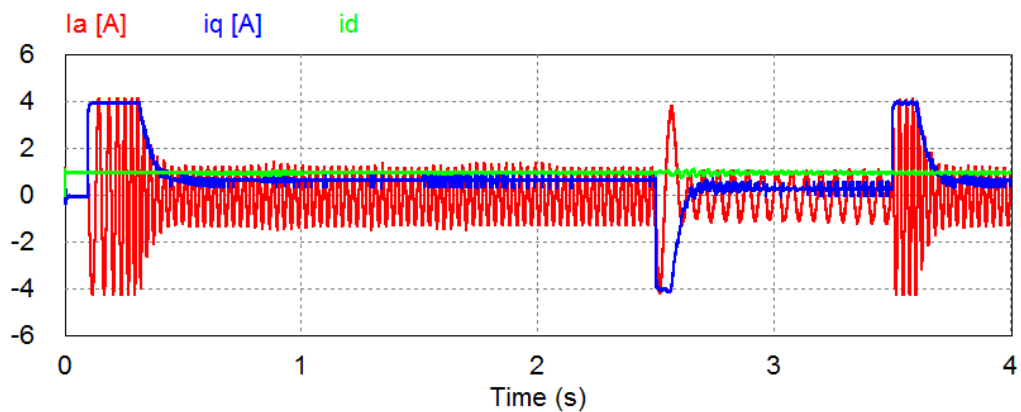


Figura 4.29: Perfil da corrente com variação da velocidade.

4.5. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Um protótipo foi construído para validar experimentalmente o conceito da separação de potências. Por limitação de *hardware*, foram utilizados apenas um inversor fonte de tensão (VSI) e um submódulo capacitivo por fase.

O protótipo, mostrado na Figura 4.30, foi produzido usando dois inversores trifásicos a *Mosfets* com potência nominal de 1kW e tensão nominal de 50V. Um destes inversores foi adaptado para a função dos submódulos capacitivos. Foram separadas as pernas do inversor e a cada fase foi acrescentado um capacitor de 10mF. O controle é feito usando um DSP F28335 da *Texas Instruments*. Todos os testes mostrados a seguir foram realizados com uma carga trifásica puramente indutiva conectada em delta de 5mH por fase representando os enrolamentos do estator de uma máquina.

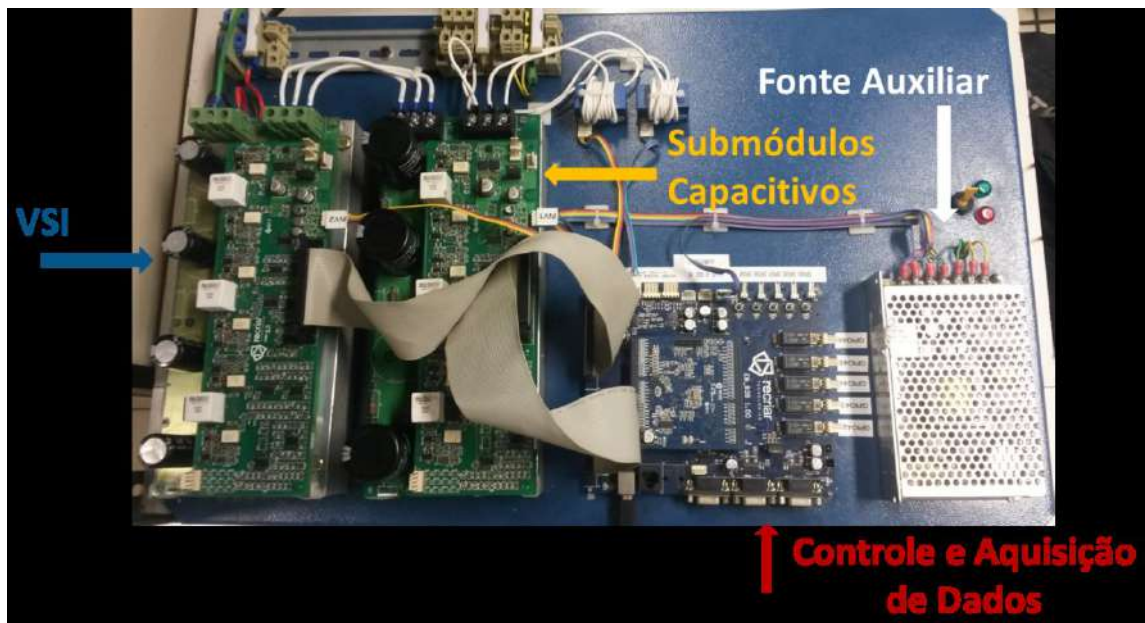


Figura 4.30: Protótipo para validação experimental.

A primeira etapa dos testes experimentais foi realizar a pré-carga e o controle da tensão nos capacitores com corrente controlada. A tensão nos capacitores é regulada em 10V e a corrente de saída em cada fase do conversor é de 1A (pico). A Figura 4.31 e a Figura 4.32 mostram os dados obtidos.

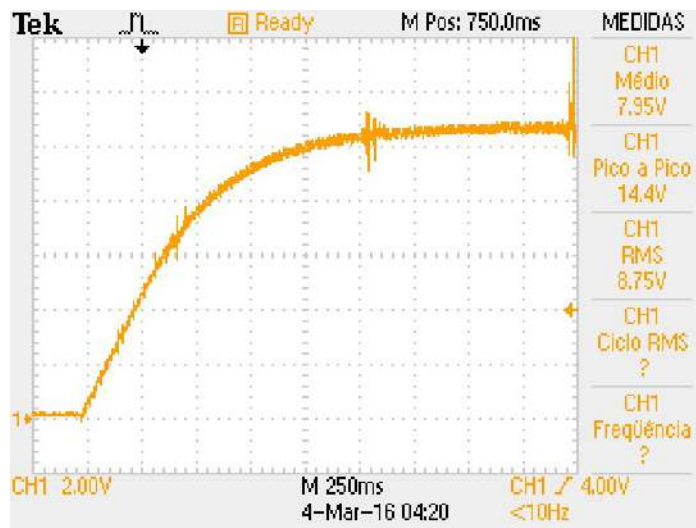


Figura 4.31: Pré carga e controle de tensão nos capacitores.

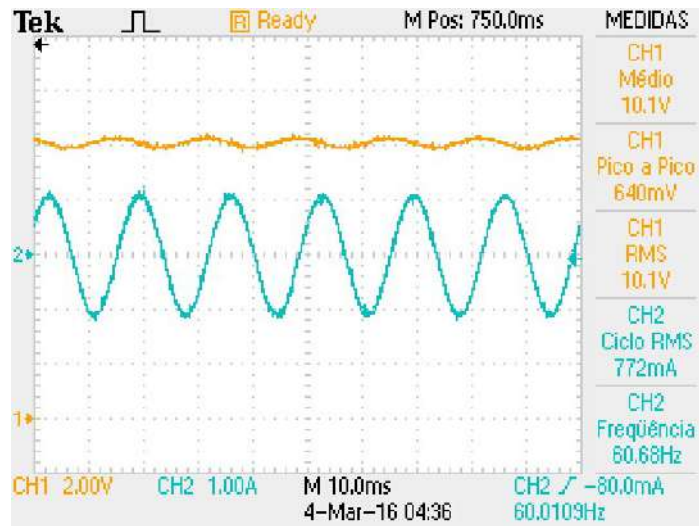


Figura 4.32: Controle de tensão nos capacitores e controle da corrente do conversor.

A seguir, um degrau de corrente foi aplicado ao sistema. A tensão entre dois terminais do VSI foi medida e filtrada usando um filtro RC. A Figura 4.33 mostra a resposta transitória da tensão para um degrau de corrente variando de 0,5 a 1A.

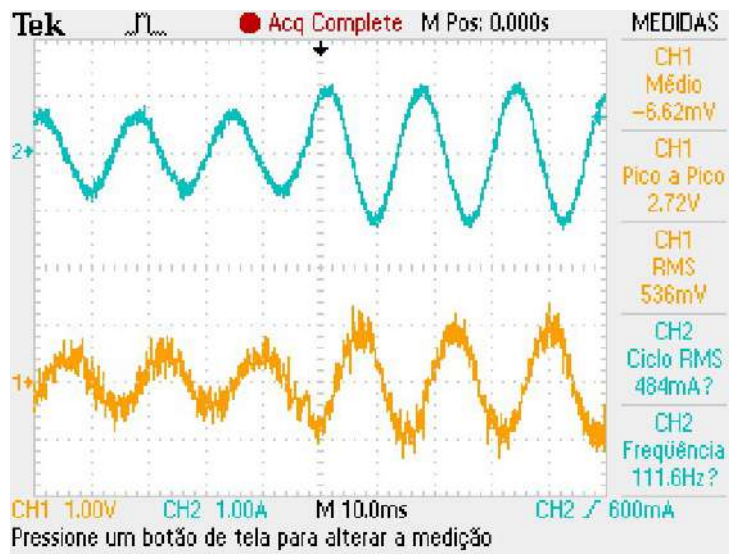


Figura 4.33: Degrau de corrente.

Após 3 ciclos contados a partir da aplicação do degrau de corrente, o controle separado das potências é iniciado. Como a carga alimentada é puramente indutiva, espera-se que a tensão na saída do VSI passe a ser nula e toda a potência fornecida seja proveniente dos capacitores. A Figura 4.34 mostra que o controle da corrente é mantido com a mudança do controle para os submódulos capacitivos.

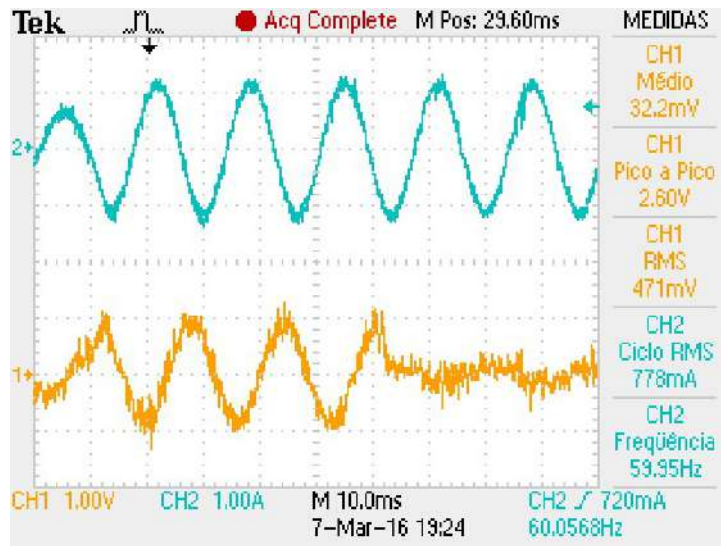


Figura 4.34: Separação das potências real e imaginária.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram apresentados os principais sistemas de conversão de energia que compõem um veículo elétrico movido a hidrogênio, dando ênfase aos motores elétricos para propulsão de veículos, ao empilhamento de células a combustível e aos conversores estáticos utilizados para controlar a distribuição de potência entre esses diferentes sistemas.

A Teoria-pq mostra-se vantajosa, dentre outras aplicações, para a separação das parcelas de potências num sistema com fontes de características diferentes, como célula a combustível, baterias e capacitores, associadas a um conversor do tipo modular. No caso específico desta aplicação, o método proposto para separação de potências mostra-se eficaz para minimizar a contribuição da CaC nas grandes variações de potência que podem ocorrer em ciclos de direção típicos, sendo esta uma funcionalidade importante para evitar reduções na vida útil da CaC e permitir que a mesma opere com maior eficiência.

Foram realizadas diferentes simulações com o objetivo de validar a proposta de controle sugerida. O controle de corrente da carga com a separação de potências foi analisado com e sem o modelo de um empilhamento de células a combustível.

O modelo simulado das células a combustível foi capaz de reproduzir corretamente em termos qualitativos o desempenho de uma CaC típica. Contudo, em termos quantitativos mostra-se necessário aperfeiçoar futuramente a forma de parametrização desse modelo, tornando-o mais bem ajustado à carga para que opere na região linear com potências similares.

Um protótipo construído, composto de um inversor fonte de tensão com submódulos capacitivos meia ponte em cascata, foi testado e mostrou que, usando uma carga indutiva, o funcionamento do controle de corrente com a separação das potências real e imaginária ocorre de maneira correta, validando parcialmente a modelagem e as análises apresentadas neste trabalho, bem como seus resultados de simulação.

Como trabalhos futuros, pode-se sugerir:

- Aplicações de diferentes controles de velocidade da máquina, com e sem sensor, para teste de compatibilidade;
- Aplicação de uma malha externa de controle para cálculo apropriado dos valores de potência real média e oscilante, visando otimizar a operação da CaC;

- Testar diferentes modelos de célula a combustível nas simulações;
- Simular sistemas com potência mais elevada, da ordem de grandeza de veículos reais (*scale-up*);
- Simular um sistema com empilhamento e controle do motor;
- Testar o protótipo com motor (malha aberta e malha fechada).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UGURLU, A., OZTUNA, S. "A Comparative Analysis Study of Alternative Energy Sources for Automobiles," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 34, September 2015.
- [2] CHAN, C.C., "The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol.95, no.4, pp.704-718, April 2007.
- [3] NICA, G. *Why Did BMW Really Stop Making the Hydrogen 7 Model?* Disponível em: <http://www.bmwblog.com/2016/08/17/bmw-stop-making-hydrogen-7-model/>. Acesso em: 20/05/2017.
- [4] BAUER, C., HOFER, J., ALTHAUS, H., *et al.*, "The Environmental Performance of Current and Future Passenger Vehicles: Life Cycle Assessment Based on a Novel Scenario Analysis Framework," *Applied Energy*, vol. 157, pp. 871-883, November 2015.
- [5] MIOTTI, M., HOFER, J., BAUER, C., "Integrated Environmental and Economic Assessment of Current and Future Fuel Cell Vehicles," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, no. 1, pp. 94–110, January 2017.
- [6] VON HELMOLT, R., EBERLE, U., "Fuel cell vehicles: Status 2007," *Journal of Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 833-843, March 2007.
- [7] BOERIU, H. *BMW and Toyota sign Agreement for Fuel Cell System, Sports Vehicle, Lightweight Technology and Lithium-air Battery.* Disponível em: <http://www.bmwblog.com/2013/01/24/bmw-and-toyota-sign-agreement-for-fuel-cell-system-sports-vehicle-lightweight-technology-and-lithium-air-battery/>. Acesso em: 20/05/2017.
- [8] MOTA, L. M. *Honda e GM juntas pelas células de combustível a hidrogénio.* Disponível em: <http://automonitor.pt/2017/01/30/tecnologia/honda-e-gm-juntas-pelas-celulas-de-combustivel-a-hidrogenio/>. Acesso em: 20/05/2017.
- [9] ALEXANDER. *New Toyota Mirai 2017 Review, Specs and Pictures.* Disponível em: <http://trueblo.com/new-toyota-mirai-2017-review-specs-and-pictures/> Acesso em: 20/05/2017.
- [10] IX35 fuel cell vehicle. Hyundai [online]. Disponível em: <https://www.hyundai.com/content/dam/hyundai/ww/en/images/footer/downloads/eco/e-brochure/ix35-fuel-cell-ebrochure-2015.pdf>. Acesso em: 20/05/2017.

- [11] EDELSTEIN, S. *Carmakers, fuel and oil companies form Hydrogen Council to promote fuel cells*. Disponível em: http://www.greencarreports.com/news/1108621_carmakers-fuel-and-oil-companies-form-hydrogen-council-to-promote-fuel-cells. Acesso em: 20/05/2017.
- [12] OLIVEIRA, L. *Honda Clarity e Toyota Mirai disparam na 'corrida' do carro a hidrogênio*. Disponível em: <http://g1.globo.com/carros/noticia/2015/10/honda-clarity-e-toyota-mirai-disparam-na-corrida-do-carro-hidrogenio.html>. Acesso em: 10/12/2015.
- [13] WEBSTER, T. *2015 Toyota Mirai - price information, specs and UK arrival*. Disponível em: <https://www.autocar.co.uk/car-news/motor-shows/hydrogen-powered-toyota-mirai-unveiled-ahead-2015-launch>. Acesso em: 10/12/2015.
- [14] VOELKER, J. *2017 Honda Clarity Fuel Cell: first drive of hydrogen-powered sedan*. Disponível em: http://www.greencarreports.com/news/1109601_2017-honda-clarity-fuel-cell-first-drive-of-hydrogen-powered-sedan. Acesso em: 20/05/2017.
- [15] VOELKER, J. *Hyundai FE Fuel Cell Concept previews hydrogen-powered SUV coming in 2018*. Disponível em: http://www.greencarreports.com/news/1109244_hyundai-fe-fuel-cell-concept-previews-hydrogen-powered-suv-coming-in-2018. Acesso em: 20/05/2017.
- [16] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Compare Fuel Cell Vehicles*. Energy Efficiency and Renewable Energy [online]. Disponível em: https://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_sbs.shtml. Acesso em: 20/05/2017
- [17] PRIMEIRO trem do mundo movido a hidrogênio começa a circular em 2017. *Gazeta do Povo* [online], Paraná, 10 novembro 2016. Disponível em: <http://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/primeiro-trem-do-mundo-movido-a-hidrogenio-comeca-a-circular-em-2017-7bobjsx14fflozl7pu4o9ln68>. Acesso em: 20/05/2017.
- [18] VOELKER, J. *Toyota 'Project Portal' hydrogen fuel-cell heavy-duty semi tractor as proof of concept*. Disponível em: http://www.greencarreports.com/news/1109999_toyota-project-portal-hydrogen-fuel-cell-heavy-duty-semi-tractor. Acesso em: 20/05/2017.
- [19] GOVERNO zera imposto de importação para carro elétrico e a hidrogênio. *Auto Esporte* [online], São Paulo, 27 outubro 2015. Disponível em:

- <http://g1.globo.com/carros/noticia/2015/10/governo-zera-imposto-de-importacao-para-carro-eletrico-e-hidrogenio.html>. Acesso em: 10/12/2017.
- [20] CONHEÇA quais são os 6 carros elétricos e híbridos disponíveis no Brasil. IG Carros. São Paulo, 01 novembro 2016. Disponível em: <http://carros.ig.com.br/2016-11-01/carros-eletricos-hibridos.html>. Acesso em: 20/05/2017.
- [21] PROTÓTIPO do 1º carro elétrico produzido com tecnologia 100% brasileira será apresentado nesta terça-feira. Paraíba.com.br [online]. João Pessoa, 4 abril 2017. Disponível em: <http://www.paraiba.com.br/2017/04/04/81863-prototipo-do-1-carro-eletrico-produzido-com-tecnologia-100-brasileira-sera-apresentado-nesta-terca-feira>. Acesso em: 20/05/2017.
- [22] APÓS testes, ônibus híbrido movido a eletricidade e hidrogênio está pronto para uso. Revista MF [online]. São Paulo, 7 abril 2017. Disponível em: <http://www.meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=20897&link=noticias>. Acesso em: 20/05/2017.
- [23] HYUNDAI welcomes opening of ultra-green hydrogen filling station. Electric Vehicle Research [online]. 23 setembro 2015. Disponível em: <http://www.electricvehiclesresearch.com/articles/8437/hyundai-welcomes-opening-of-ultra-green-hydrogen-filling-station>. Acesso em: 20/05/2017.
- [24] EDELSTEIN, S. *Shell hedges bets, adds hydrogen fuel to 1st U.K. station*. Disponível em: http://www.greencarreports.com/news/1109009_shell-hedges-bets-adds-hydrogen-fuel-to-1st-u-k-station. Acesso em: 20/05/2017.
- [25] KUMAR, L., JAIN, S., "Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 924-940, January 2014.
- [26] AJANOVIC, A., "The Future of Electric Vehicles: Prospects and Impediments," *WIREs Energy and Environments*, vol. 4, no. 6, pp. 521–536, November 2015.
- [27] MKAHL, R., NAIT-SIDI-MOH, A., GABER, J., WACK, M., "An Optimal Solution for Charging Management of Electric Vehicles Fleets," *Electric Power Systems Research*, vol. 146, pp. 177-188, May 2017.
- [28] ZENGINIS, I., VARDAKAS, J. S., ZORBA, N., VERIKOUKIS, C. V., "Analysis and quality of service evaluation of a fast charging station for electric vehicles," *Energy*, vol. 112, pp. 669-678, October 2016.

- [29] SUCIU, G., PASAT, A., "Challenges and opportunities for batteries of electric vehicles," *10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, pp. 113-117, Bucharest, Romania, 23-25 March 2017.
- [30] BORGE, P., "Water Babies," in *Electric and Hybrid Vehicle Technology International*, pp. 72-78, July 2015.
- [31] EMADI, A., RAJASHEKARA, K., WILLIAMSON, S. S., LUKIC, S. M., "Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, no. 3, pp. 763-770, May 2005.
- [32] MIRAI fuel cell vehicle. Toyota [online]. Disponível em: <https://ssl.toyota.com/mirai/fcv.html>. Acesso em: 20/05/2017.
- [33] LAUGHTON, M. A., "Fuel cells," in *Engineering Science and Education Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 7-16, Feb 2002.
- [34] FIORI, C., DELL'ERA, A., ZUCCARI, F., *et al.*, "Critical Review of Fuel Cell's Membranes and Identification of Alternative Types for Automotive Applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 35, pp. 11949-11959, September 2015.
- [35] LOPES, F. C., 2013, Modelagem de Empilhamentos de Células a Combustível PEM por Redes. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [36] ROWE, A., LI, X., "Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, vol. 102, no. 1-2, pp. 82-96, December 2001.
- [37] WANG, C., NEHRIR, M. H., "Fuel Cells and Load Transients," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, no. 1, pp.58-63, January 2007.
- [38] BUYUKDEGIRMENCI, V. T., BAZZI, A. M., KREIN, P. T., "Evaluation of Induction and Permanent-Magnet Synchronous Machines Using Drive-Cycle Energy and Loss Minimization in Traction Applications," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 1, pp. 395-403, Jan. 2014.
- [39] CHANG, L. "Comparison of AC drives for electric vehicles-a report on experts' opinion survey," in *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 9, no. 8, pp. 7-11, Aug. 1994.
- [40] ZERAOULIA, M., BENBOUZID, M. E. H., DIALLO, D., "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study," in

- IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 6, pp. 1756-1764, Nov. 2006.
- [41] FINKEN, T., FELDEN, M., HAMEYER, K., "Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles," *18th International Conference on Electrical Machines*, pp. 1-5, Vilamoura, Portugal, 6-9 September 2008.
- [42] GOSS, J., POPESCU, M., STATON, D., "A comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electric vehicle application," *International Electric Machines & Drives Conference*, Chicago, USA, pp. 220-225, 12-15 May 2013.
- [43] BOGLIETTI, A., EL-REFAIE, A.M., DRUBEL, O., *et al.*, "Electrical Machine Topologies: Hottest Topics in the Electrical Machine Research Community," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol.8, no.2, pp.18-30, June 2014.
- [44] BETIN, F., CAPOLINO, G. A., CASADEI, D., *et al.*, "Trends in Electrical Machines Control: Samples for Classical, Sensorless, and Fault-Tolerant Techniques," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 43-55, June 2014.
- [45] ZHU, Z. Q., HOWE, D., "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746-765, April 2007.
- [46] TARIQ, A. R., NINO-BARON, C. E., STRANGAS, E. G., "Consideration of magnet materials in the design of PMSMs for HEVs application," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp.1-6, Detroit, Michigan, USA, 24-29 July 2011.
- [47] ATSUMI, Y., SUZUKI, H., MIYAZAKI, T., *et al.*, "Vehicle Dynamics Performance of Clarity Fuel Cell," *Honda R&D Technical Review*, vol. 29, no. 6, pp. 39-45, April 2017.
- [48] PATEL, S. R., GANDHI, N., CHAITHANYA, N., *et al.*, "Design and development of Switched Reluctance Motor for electric vehicle application," *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1-6, Trivandrum, India, 14-17 December 2016.
- [49] RAHMAN, K., JURKOVIC, S., SAVAGIAN, P. J., *et al.*, "Retrospective of electric machines for EV and HEV traction applications at general motors,"

- IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 1-8, Milwaukee, Wisconsin, USA, 18-22 September 2016.
- [50] EMADI, A., WILLIAMSON, S. S., KHALIGH, A., "Power Electronics Intensive Solutions for Advanced Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicular Power Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 3, pp. 567-577, May 2006.
- [51] PRASANNA, U. R., XUEWEI, P., RATHORE, A. K., RAJASHEKARA, K., "Propulsion System Architecture and Power Conditioning Topologies for Fuel Cell Vehicles," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 1, pp. 640-650, January 2015.
- [52] SOLERO, L., LIDOZZI, A., POMILIO, J. A., "Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 5, pp. 1007-1016, September 2005.
- [53] NEUBURGER, M., THRIMAWITHANA, D. J., "A new topology for fuel cell power trains including a new integrated converter," *IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1-4, Fortaleza, Brazil, 29 November-2 December 2015.
- [54] ATTAIANESE, C., DI MONACO, M., TOMASSO, G., "Power Control for Fuel-Cell–Supercapacitor Traction Drive," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 5, pp. 1961-1971, Jun 2012.
- [55] MARX, N., BOULON, L., GUSTIN, F., *et al.*, "A Review of Multi-Stack and Modular Fuel Cell Systems: Interests, Application Areas and On-Going Research Activities," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 23, pp. 12101-12111, August 2014.
- [56] CHAPMAN, S. J., *Electric Machinery Fundamentals*. 2ed. Mcgraw-Hill College, 1991.
- [57] BOSE, B. K., *Modern Power Electronics and AC Drives*. 1st. Prentice Hall PTR, 2002.
- [58] KRISHNAN, R., "Review of flux-weakening in high performance vector controlled induction motor drives," *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 917-922 vol.2, Warsaw, Poland, 17 June 1996.

- [59] KIM, J.; JUNG, J.; NAM, K. "Dual-Inverter Control Strategy for High-Speed Operation of EV Induction Motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 2, pp. 312–320, April 2004.
- [60] WELCHKO, B. A., "A double-ended inverter system for the combined propulsion and energy management functions in hybrid vehicles with energy storage," *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 6, Raleigh, NC, USA, 6-10 November 2005.
- [61] SOLANO, O., ROLIM, L. G. B., SUEMITSU, W. I., "Independent p-q control of a dual-converter induction motor drive for extended constant-power operation," *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1827-1832, Florence, Italy, 23-26 October 2016.
- [62] RUEDA, O. A. S., 2014, *Controle do Motor de Indução para Veículos Elétricos Mediante o Uso de Duplo Conversor*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [63] DU, Z., OZPINECI, B., TOLBERT, L. M., CHIASSON, J. N., "DC–AC Cascaded H-Bridge Multilevel Boost Inverter With No Inductors for Electric/Hybrid Electric Vehicle Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 3, pp. 963-970, May-june 2009.
- [64] FERNANDES, P. G. G., 2016, *Conversor Multinível Tipo Escada com Gerenciamento Integrado de Baterias para Veículos Elétricos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [65] MAO, M., TAO, T., DING, Y., *et al.*, "Multi-objective power management strategy for MMC-Based EV Fleet Integrated into smart grid," *IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, pp. 2863-2869, Hefei, China, 22-26 May 2016.
- [66] DUESTERHOEFT, W. C., SCHULZ, M. W., CLARKE, E., "Determination of Instantaneous Currents and Voltages by Means of Alpha, Beta, and Zero Components," in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 70, no. 2, pp. 1248-1255, July 1951.
- [67] AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M., *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. 1 ed. New York, IEEE Press Editorial Board/ Wiley Interscience, 2007.
- [68] BARRENA, J. A., MARROYO, L., VIDAL, M. A. R., APRAIZ, J. R. T., "Individual Voltage Balancing Strategy for PWM Cascaded H-Bridge

- Converter-Based STATCOM," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.55, no.1, pp.21-29, January 2008.
- [69] JÚNIOR, J. A. S., 2003, *Controle Robusto H_∞ Aplicado Em Motores de Indução*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [70] CORRÊA, J. M., FARRET, F. A., CANHA, L. N.,SIMÕES, M. G., "An Electrochemical-Based Fuel-Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 5, pp. 1103-1112, October 2004.
- [71] LIMA, L. P., FARRET, F. A., RAMOS, D. B., FERRIGOLO, F. Z., STANGARLIN, H. W., TRAPP, J. G., SERDOTE, A. B., "PSIM Mathematical Tools to Simulate PEM Fuel Cells Including the Power Converter," *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pp. 2784-2789, Porto, Portugal, 3-5 November 2009.
- [72] WANG, C., NEHRIR, M. H., SHAW, S. R., "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 20, no.2, pp. 442-451, June 2005.
- [73] MANN, R., AMPHLETT, J. C., HOOPER, M. A. I., *et al.* "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell", *Journal of Power Sources*, vol. 85, no. 1-2, pp. 173-180, March 2000.
- [74] AMPHLETT, J. C., BAUMERT, R. M., MANN, R. F., *et al.*, "Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell – Part I: Mechanistic Model Development", *Journal of Electrochemical Society*, vol. 142, no. 1, pp. 1-8, January 1995.
- [75] AMPHLETT, J. C., BAUMERT, R. M., MANN, R. F., *et al.*, "Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell – Part II: Empirical Model Development", *Journal of Electrochemical Society*, vol. 142, no. 1, pp. 9-15, January 1995.

APÊNDICE – CURVAS DE POLARIZAÇÃO E EFICIÊNCIA DE UM EMPILHAMENTO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL REAL

Usando o empilhamento de células a combustível do tipo PEM H-3000 da fabricante Horizon, foi realizado um ensaio de variação da corrente para mapear a tensão produzida nos seus terminais. Este empilhamento, que se encontra no Laboratório de Células a Combustível do Centro de Pesquisas em Energia Elétrica – Cepel, possui potência nominal de 3kW com 72 células conectadas em série.

Com o auxílio de uma carga eletrônica, variou-se a corrente em degraus e a tensão de saída do empilhamento e foi medida a cada degrau.

Para mapear de maneira mais precisa a região do sobrepotencial de ativação (baixas correntes), a corrente foi aumentada de 2,5A até que atingisse 10A. A partir deste valor até 70A, os degraus de corrente passaram a ser de 5A. Ao atingir 70A, a corrente passa a decrescer com o mesmo perfil de variação até que se anule. A Figura A.1: Perfis da tensão e da corrente medidas. mostra o perfil de corrente aplicado e a tensão, ambos medidos com o auxílio de um osciloscópio.

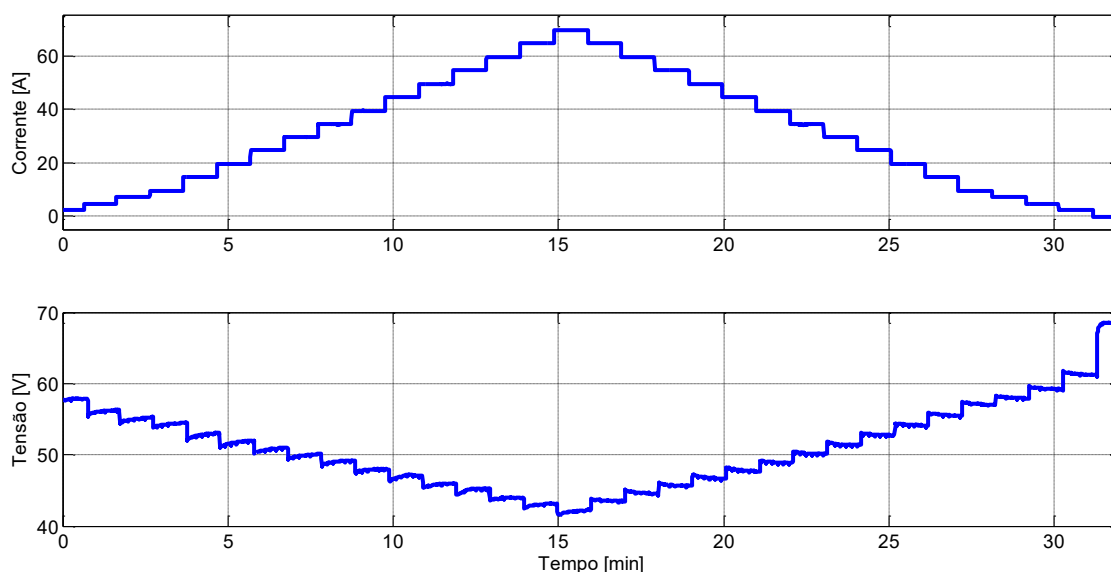


Figura A.1: Perfis da tensão e da corrente medidas.

Com os dados obtidos por um *data logger*, foi traçada a curva de polarização da CaC. O intervalo de amostragem do *data logger* é maior que o do osciloscópio e com isso temos um número menor de pontos, não conseguindo um detalhamento tão grande nos perfis de corrente e tensão. Porém, esse número menor de amostras é suficiente para

fazer uma média aproximada dos dados e obter a curva de polarização com alguma precisão. A Figura A.2 mostra a curva VxI obtida neste experimento.

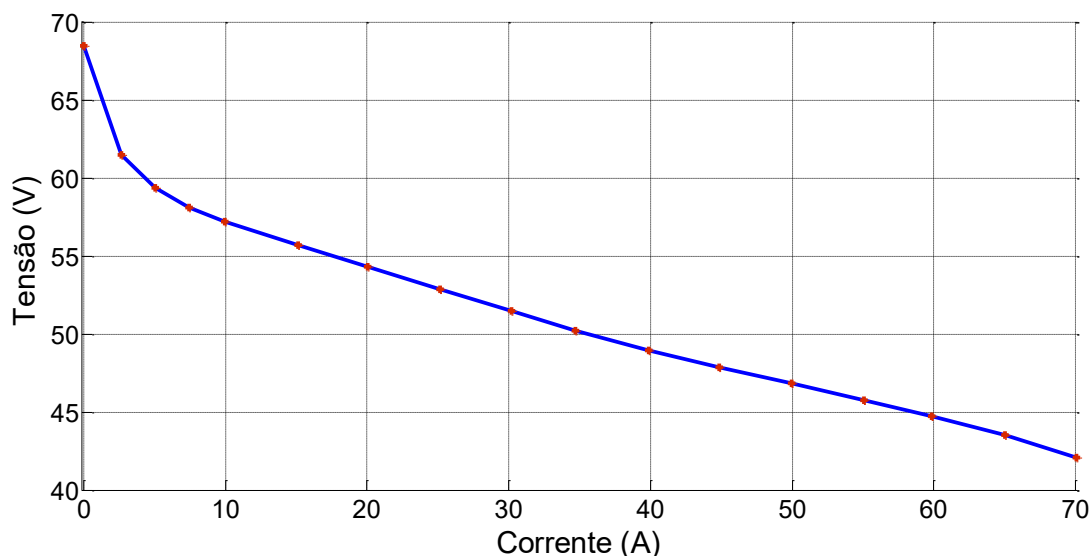


Figura A.2: Curva de polarização do empilhamento.

Para calcular a eficiência do empilhamento, que é dada pela relação entre a energia elétrica obtida e a energia química disponível, foram feitas também medidas da vazão de hidrogênio. A Figura A.3 mostra o perfil da vazão de H₂ medida em litros por minuto.

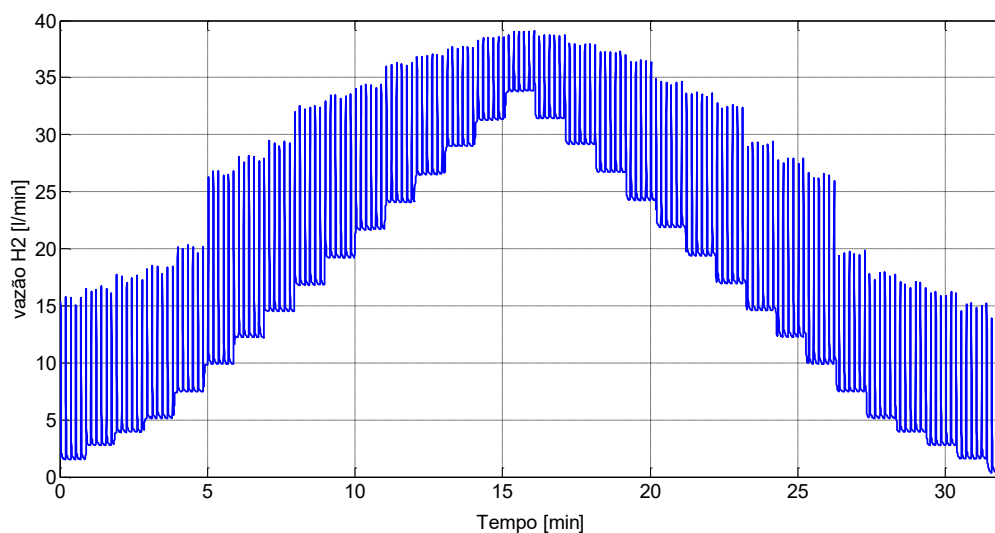


Figura A.3: Vazão de H₂ medida.

Os dados de vazão são importantes para o cálculo da energia eletroquímica disponível neste empilhamento que é dada pela integral da vazão no intervalo de tempo que se quer determinar multiplicado pelo potencial calorífico inferior do hidrogênio que é igual a $-241,83 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

A vazão de H₂ é proporcional a corrente demandada pelo empilhamento e o seu controle feito pelo controlador interno. A cada 10s é acionada a purga ou saída do excesso de gases inertes e água que possam estar acumulados no anodo. Com a variação da pressão decorrente desta abertura, há um pico na vazão de hidrogênio a cada 10s.

A forma de onda não linear que mais se aproximou da curva de pico da vazão de H₂, mostrada na Figura A.4, é da forma:

$$f(x) = ae^{bx} + ce^{dx}$$

E os parâmetros ajustados são dados na Tabela A-0-1.

Tabela A-0-1: Ajuste de curva

Parâmetro	Valor
a	2,966. 10 ⁴
b	-78,52
c	2,965. 10 ⁴
d	-78,51

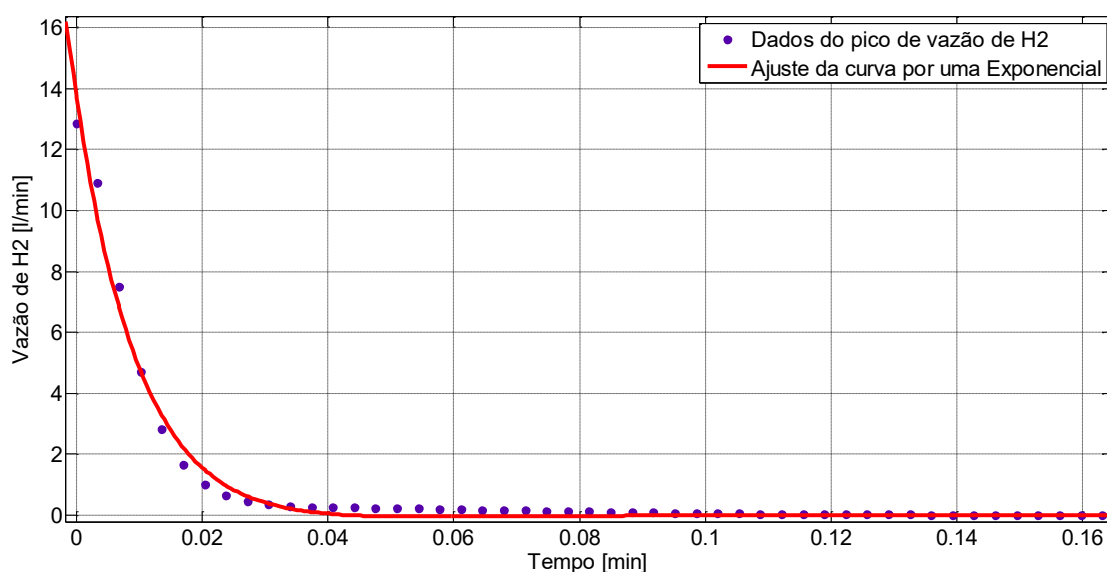


Figura A.4: Ajuste de curva do pico da vazão de hidrogênio.

Considerando que a subida do pico é instantânea e que a cada degrau de corrente ocorrem 6 picos, pode-se fazer um cálculo aproximado da quantidade em porcentagem da energia dos picos por ciclo comparando 6 vezes a área sob a Figura A.4 com a área total em 1 ciclo.

A integral da vazão no período avaliado resultou em 8,53L, enquanto a integral da vazão apenas no pico resulta em 0,14L. Dessa forma, aproximadamente 10% da energia química são provenientes dos picos ocasionados pela purga do H₂. Então, esta

não linearidade não pode ser desprezada no cálculo da eficiência do empilhamento, resultando em um aumento da eficiência devido à diminuição da energia química disponível.

A energia elétrica é dada pela integral no tempo que se deseja calcular a potência elétrica instantânea, isto é, a multiplicação entre a corrente e a tensão medidas no terminal da pilha em cada instante. A Figura A.5 mostra a eficiência instantânea calculada a cada intervalo de variação da corrente pela potência instantânea do empilhamento.

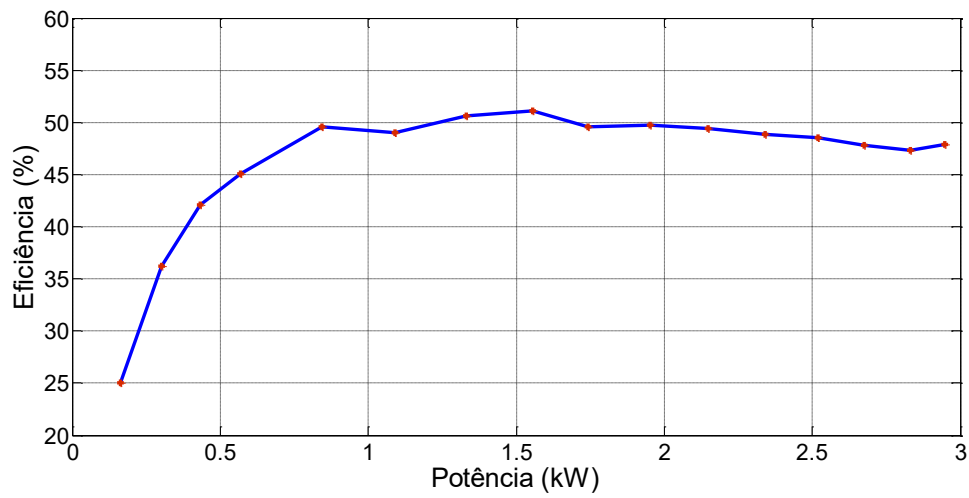


Figura A.5: Eficiência e Potência Elétrica.