UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Cassius Rossi de Aguiar

**CONTRIBUIÇÃO AO GERENCIAMENTO E
CONTROLE DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL E
ARMAZENADORES DE ENERGIA PARA A
OPERAÇÃO EM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

São Carlos
2016

Cassius Rossi de Aguiar

**CONTRIBUIÇÃO AO GERENCIAMENTO E
CONTROLE DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL E
ARMAZENADORES DE ENERGIA PARA A
OPERAÇÃO EM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas Dinâmicos.

Orientador: Ricardo Quadros Machado

São Carlos
2016

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

R282c Rossi de Aguiar, Cassius
Contribuição ao Gerenciamento e Controle de Células
a Combustível e Armazenadores de Energia para a
Operação em Geração Distribuída / Cassius Rossi de
Aguiar; orientador Ricardo Quadros Machado. São Carlos,
2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2016.

1. Geração Distribuída. 2. Célula a Combustível. 3.
Processamento de Energia. 4. Conversor CC-CC. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **CASSIUS ROSSI DE AGUIAR.**

Título da tese: "Contribuição ao gerenciamento e controle de células a combustível e armazenadores de energia para a operação em geração distribuída".

Data da defesa: 17/11/2016.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Ricardo Quadros Machado (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Mario Oleskovicz**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profa. Titular **Vilma Alves de Oliveira**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Felix Alberto Farret**
(Universidade Federal de Santa Maria/UFSM)

Prof. Dr. **Mauricio Aredes**
(Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ)

Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Agradecimentos

Gostaria de agradecer e expressar minha gratidão às pessoas que colaboraram de forma direta ou indireta para que este trabalho pudesse hoje estar finalizado.

Primeiramente agradeço a Deus por mais esta oportunidade na minha vida. Aos meus pais por estarem ao meu lado e apoiarem todas as minhas decisões, especialmente a minha mãe Rejane e meu pai Valmir pelas palavras de carinho e aos meus irmãos Anderson e Etienne pela confiança e apoio.

Um agradecimento especial a minha esposa Kelen que sempre esteve ao meu lado para me incentivar nas horas em que mais precisei de estímulo para continuar. Obrigado pela paciência e carinho.

Ao professor orientador, Dr. Ricardo Quadros pela orientação técnica e científica, amizade e credibilidade dada ao trabalho.

A professora Dr^a. Vilma Alves de Oliveira pela colaboração e suporte.

Aos professores Ph.D. Felix Alberto Farret, Dr. Renato Machado Monaro, Dr. Mário Oleskovicz e Maurício Aredes pelas contribuições e sugestões dadas ao trabalho.

Aos colegas do LFAPE e LAC pela amizade, companheirismo e suporte no desenvolvimento deste trabalho.

A UTFPR pelo suporte fornecido durante a execução deste trabalho.

E, finalmente, à Escola de Engenharia de São Carlos pelo suporte fornecido ao desenvolvimento deste trabalho, à FAPESP pelo apoio financeiro através da bolsa que me foi concedida FAPESP 2013/09788-0, pelo projeto FAPESP 2013/20721/4 e à Capes pelo apoio financeiro dado através do projeto 88881.030370/2013-01.

Resumo

AGUIAR, C. R. (2016). “Contribuição ao Gerenciamento e Controle de Células a Combustível e Armazenadores de Energia para a Operação em Geração Distribuída”. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

A presente tese busca desenvolver uma metodologia para o gerenciamento e controle de uma geração distribuída que utiliza como fonte principal células a combustível do tipo PEM (Proton Exchange Membrane). A finalidade do trabalho consiste em analisar, controlar e gerenciar a operação da célula a combustível (CaC) nas operações ilhada e conectada em relação à rede de distribuição. Nos primeiros capítulos do texto é elaborada uma revisão acerca do princípio de funcionamento e do modelo da CaC. Após este estágio inicial, são analisadas e modeladas as estruturas dos estágios CC e CA que compõem a geração distribuída. Para o modo conectado é desenvolvida uma estratégia para o controle da tensão do link CC que, a partir da regulação da corrente do estágio CA, permite o gerenciamento da potência fornecida pela CaC. Sequencialmente ao texto e com a adição do estágio de armazenamento de energia, é apresentada uma proposta que vincula a dinâmica da CaC com a estrutura de gerenciamento do estágio CC e CA. Esse fato garante que a alteração do ponto de operação da CaC seja descrito conforme uma dinâmica predeterminada, garantindo assim que transitórios não sejam absorvidos pela CaC. Como parte final da tese, é desenvolvida uma estratégia para a inicialização da CaC, a qual associa o próprio comportamento da célula e o estágio de armazenamento de energia. Os resultados apresentados ao longo do texto mostram que as estruturas propostas tornam a CaC menos sensível a transitórios de carga, além de serem capazes de deslocar (gerenciar) o ponto de operação da célula. Ao final de cada capítulo, são apresentados resultados experimentais e de simulações que auxiliam o entendimento e suportam as propostas do trabalho.

Palavras-Chave: Geração Distribuída, Célula a Combustível, Processamento de Energia, Conversor CC-CC.

Abstract

AGUIAR, C. R. (2016). “Contribution to the Management and Control of Fuel Cells and Energy Storage Devices to Operate in Distributed Generation”. Ph.D. Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2016.

This thesis proposes a methodology for management and control of distributed generation with a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) as the main source. Additionally, the analysis of performance is used when the PEM fuel cell operates in two different operation modes, i.e. in grid-connected and stand-alone modes. In the first chapters, a review of main features and a mathematical model of fuel cells are presented. Sequentially, the theoretical models of the DC- and AC-power converters are analyzed. For grid-connected operation mode, a strategy based on the DC-link voltage control is proposed via current regulation of the AC stage affording thus the management of the power produced by the fuel cell. Additionally, with the use of the storage devices, a proposal that associates the dynamics of the PEM fuel cell with the DC and AC stages is shown. This fact ensures that the movement of the fuel cell operating point is described within a predetermined dynamic, ensuring that transients are not absorbed by the fuel cell. Finally, a strategy for the startup of fuel cell in association with the energy storage stage is developed. The results show that the proposed structures makes the cell less sensitive to the load transient, in order to move (manage) the fuel cell operating point. At the end of each chapter, experimental and simulation results are presented to support the proposed approach.

Keywords: Distributed Generation, Fuel Cell, Power Management, DC-DC Converter.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Ilustração do funcionamento de uma célula unitária. Adaptada de [13].....	38
Figura 2.2: Ilustração de uma pilha de CaCs em série. Adaptada de [14].	39
Figura 2.3: Entradas e saídas do processo de conversão de energia da CaC.....	41
Figura 2.4: Curva teórica de polarização (v versus i) de uma CaC.	53
Figura 2.5: Descrição funcional da CaC.....	54
Figura 2.6: Curva de polarização (v versus i) (a) e Curva de potência (P versus i) (b).	56
Figura 2.7: Variação de temperatura. (a) Curva de polarização (v versus i) e (b) Curva de potência (P versus i).	57
Figura 2.8: Curva de polarização (v versus i) (a) e Curva de potência (P versus i) (b).	59
Figura 2.9: Circuito elétrico equivalente.	60
Figura 2.10: Representação da curva teórica para obtenção da dinâmica da CaC através do método de interrupção de corrente.	61
Figura 2.11: Escala vertical: transitório de corrente na CaC de 35 A para 20 A. Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (2,5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 25 ms/div (b).....	62
Figura 2.12: Escala vertical: transitório de corrente na CaC de 20 A para 10 A. Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 100 ms/div (b).....	63
Figura 2.13: Escala vertical: transitório de corrente na CaC de 10 A para 0 A. Pink: corrente CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão (5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 250 ms/div (b).	63
Figura 2.14: Circuito elétrico equivalente por regiões de operação.	64

Figura 2.15: Escala vertical: transitório de corrente de 0 A para 10 A. Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Escala horizontal: 100 ms/div.....	64
Figura 2.16: Escala vertical: transitório de corrente de 10 A para 20 A. Pink: corrente da CaC(x8) (250 mA/div). Azul: tensão da CaC (2,5 V/div). Escala horizontal: 10 ms/div.....	65
Figura 2.17: Escala vertical: transitório de corrente de 20 A para 35 A. Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Escala horizontal: 10 ms/div.....	65
Figura 2.18: Diagrama do modelo da CaC desenvolvido.	66
Figura 2.19: Escala vertical: transitório de corrente de 20 A para 10 A. Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div) (a) e simulação (b). Escala horizontal: 100 ms/div (a).	67
Figura 3.1: Configuração genérica <i>interleaved</i>	70
Figura 3.2: Comparação da ondulação e distribuição da corrente entre (a) <i>boost</i> convencional e (b) <i>boost interleaved</i>	71
Figura 3.3: Configuração da geração distribuída com foco na estrutura CC.	72
Figura 3.4: Intervalos de chaveamento do conversor <i>interleaved</i>	73
Figura 3.5: Malha de controle (a) corrente da CaC e (b) tensão do link CC.	77
Figura 3.6: Resposta em frequência em malha aberta para (a) corrente da CaC e (b) tensão do link CC.	78
Figura 3.7: CaC e conversor <i>interleaved</i> testados experimentalmente.	79
Figura 3.8: Escala vertical: inicialização da CaC e degrau no link CC (a) e detalhe da tensão e corrente da CaC (b). Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor (10 A/div). Pink: corrente da fase “b” do conversor (10 A/div). Marrom: soma das correntes dos braços do conversor (10 A/div). Roxo: potência da CaC (200 W/div). Escala horizontal: 10 s/div.	80
Figura 3.9: Escala vertical: degraus de corrente da CaC (a) e ondulação da corrente da CaC (b). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor (2,5 A/div). Pink: corrente da fase “b” do conversor (2,5 A/div). Escala horizontal: 50 ms/div (a) e 50 μ s/div (b).	81
Figura 3.10: Escala vertical: entrada (a) e saída (b) de carga. Verde: tensão do link CC (25 V/div). Azul: tensão da CaC (2,5 V/div). Escala horizontal: 500 ms/div (a) e 50 ms/div (b).	82

Figura 4.1: Configuração da geração distribuída com foco na estrutura CA.	84
Figura 4.2: Diagrama simplificado para o modo ilhado.	85
Figura 4.3: Malha de controle em tensão CA para o modo ilhado.	89
Figura 4.4: Resposta em frequência do controle em tensão CA para (a) malha aberta e (b) malha fechada.	90
Figura 4.5: Controle ressonante.	90
Figura 4.6: Resposta em frequência do controle em tensão CA com controlador ressonante em 60 Hz para (a) malha aberta e (b) malha fechada.	91
Figura 4.7: Diagrama simplificado para o modo conectado.	92
Figura 4.8: Controlador de corrente com desacoplamento dos eixos.	94
Figura 4.9: Malha de controle de corrente da GD para o modo conectado.	95
Figura 4.10: Resposta em frequência do controle em corrente em malha aberta.	96
Figura 4.11: Algoritmo de sincronização PLL.	96
Figura 4.12: Diagrama de blocos do PLL.	97
Figura 4.13: Saturador dinâmico.	98
Figura 4.14: Resposta ao degrau do PLL com (cinza) e sem (laranja) saturação dinâmica.	99
Figura 4.15: GD testada experimentalmente.	100
Figura 4.16: Visão geral do protótipo construído. Tanque de hidrogênio (a), CaC (b), estágio CC (c) e estágio CA (d).	101
Figura 4.17: Escala vertical: inicialização da GD (a) e detalhe da rampa de tensão (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Escala horizontal: 10 s/div (a) e 500 ms/div (b).	102
Figura 4.18: Escala vertical: inicialização da GD em rampa (a) e detalhe da tensão em fase com a corrente fase (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Escala horizontal: 200 ms/div (a) e 10 ms/div (b).	103
Figura 4.19: Escala vertical: duas fases da GD (a) e detalhe da defasagem da tensão e corrente de duas fases da GD (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (60 V/div). Pink: corrente da fase	

“a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da fase “b” da GD (60 V/div). Amarelo: corrente da fase “b” da GD (5 A/div). Escala horizontal: 1 s/div (a) e 10 ms/div (b).	103
Figura 4.20: Escala vertical: tensão do link CC na inicialização da GD em rampa. Verde: tensão do link CC (25 V/div). Escala horizontal: 500 ms/div.	104
Figura 4.21: Escala vertical: inicialização da CaC associada com a GD (a) e detalhe da tensão e corrente da CaC (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 10 s/div (a) e 500 ms/div (b).	104
Figura 4.22: Escala vertical: tensão e corrente da CaC associada com a GD. Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 10 ms/div.	105
Figura 4.23: Espectro em frequência da corrente da CaC (experimental) para o controle ilhado.....	105
Figura 4.24: Escala vertical: manobras de carga no PAC. Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (3 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 10 s/div.	106
Figura 4.25: Escala vertical: degraus de carga, primeiro degrau (a) e segundo degrau (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (25 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (1,5 A/div). Escala horizontal: 50 ms/div (a) e 20 ms/div (b).	106
Figura 4.26: Escala vertical: retirada de carga, primeira retirada (a) e segunda retirada (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (25 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (1,5 A/div). Escala horizontal: 50 ms/div (a).....	107
Figura 4.27: Escala vertical: manobras de carga no PAC refletidas no estágio CC. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Marrom: Potência fornecida pela CaC (200 W/div). Roxo: corrente total da CaC (10 A/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor da CaC (10 A/div). Pink: corrente da fase “b” do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 10 s/div.	107
Figura 4.28: Escala vertical: tensão da CaC. Azul: tensão da CaC (1 V/div). Escala horizontal: 10 s/div.....	108
Figura 4.29: Escala vertical: degraus (a) e (b) e retiradas (c) e (d) de carga. Tensão na CaC. Azul: tensão da CaC (1 V/div). Escala horizontal: 2 s/div.	108

Figura 4.30: Escala vertical: degraus de corrente no PAC. Corrente da CaC (a) e detalhe da corrente associada a GD (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (3 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (2 A/div em (a) e 10 A/div em (b)). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 100 ms/div (b). 109

Figura 4.31: Escala vertical: retirada de carga no PAC. Corrente da CaC (a) e detalhe da corrente associada a GD (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (3 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (2 A/div em (a) e 10 A/div em (b)). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 100 ms/div (b). 109

Figura 4.32: Escala vertical: sincronização da GD com a rede (a) e detalhe da GD e rede sincronizadas (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da fase “a” da rede (50 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 20 ms/div (a) e 10 ms/div (b). 110

Figura 4.33: Escala vertical: momento da conexão com a rede (a) e detalhe da conexão (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da fase “a” da rede (50 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 20 ms/div (a) e 4 ms/div (b). 111

Figura 4.34: Escala vertical: momento da conexão com a rede no estágio CC (a) e detalhe da conexão (b). Verde: tensão do link CC (50 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div. 111

Figura 4.35: Escala vertical: transferência de potência para a rede. Verde: tensão da fase “a” da GD (60 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div. 112

Figura 4.36: Escala vertical: transferência de potência para a rede com foco no estágio CC. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (5 A/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div. 113

Figura 4.37: Escala vertical: transferência de potência para a rede com foco no estágio CC. Acréscimo (a) e decréscimo de potência (b). Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (5 A/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 200 ms/div. 113

Figura 4.38: Escala vertical: detalhe da corrente injetada na rede. Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 10 ms/div.....	114
Figura 5.1: Escala vertical: degrau de tensão de 28 V para 34 V (a) e 34 para 44 V (b). Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Escala horizontal: 20 s/div.....	118
Figura 5.2: Escala vertical: degrau de tensão de 44 V para 34 V (a) e 34 para 28 V (b). Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 20 s/div (b).....	118
Figura 5.3: Escala vertical: detalhe da corrente com o efeito da purga. Pink: corrente da CaC(x8) (100 mA/div). Escala horizontal: 2 s/div.	119
Figura 5.4: Diagrama simplificado do controle do link CC em cascata com o controle de corrente da GD para o modo conectado.....	121
Figura 5.5: Malha de controle da tensão do link CC.	124
Figura 5.6: Resposta em frequência em malha aberta do controle de tensão do link CC.....	125
Figura 5.7: GD simulado e testado experimentalmente para o gerenciamento da CaC no modo conectado.	126
Figura 5.8: Escala vertical: conexão no cenário com gerenciamento CC. Aspecto geral do estágio CA (a) e detalhe da conexão (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da fase “a” da rede (50 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 1 s/div (a) e 20 ms/div (b).	127
Figura 5.9: Espectro de frequência da corrente da GD.	128
Figura 5.10: Escala vertical: conexão no cenário com gerenciamento do ponto de operação da CaC. Amarelo: corrente da CaC (2,5 A/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (2,5 A/div). Escala horizontal: 500 ms/div.....	128
Figura 5.11: Escala vertical: conexão no cenário com gerenciamento do ponto de operação da CaC. Azul: tensão da CaC (2,5 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (2,5 A/div). Escala horizontal: 500 ms/div.	129
Figura 5.12: Espectro de frequência da corrente da CaC. 0 – 50 kHz em dB (a) e 0 – 10Hz (b).	130

Figura 5.13: Escala vertical: momento da conexão no cenário com gerenciamento CC. Verde: tensão do link CC (10 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (1 A/div). Escala horizontal: 1 s/div.	131
Figura 5.14: Espectro de frequência da tensão do link CC.	131
Figura 5.15: Curva teórica de polarização ($V \times I$) e ($P \times I$) para um acréscimo ou decréscimo de potência da CaC.	132
Figura 5.16: Potência da CaC em diversos pontos de operação (simulação).	133
Figura 5.17: Escala vertical: diferentes pontos de operação da CaC. Tensão da CaC (a) e corrente da CaC (b). Azul: tensão da CaC (2,5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (2 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	134
Figura 5.18: Diferentes pontos de operação da CaC. Tensão da CaC (a) e corrente da CaC (b) (simulação).	134
Figura 5.19: Escala vertical: visão geral do gerenciamento da energia da CaC. Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	135
Figura 5.20: Escala vertical: visão geral do gerenciamento da energia da CaC. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Azul escuro: corrente total da CaC (5 A/div). Laranja: potência da CaC (200 W/div). Pink: corrente da fase “b” do conversor CC (5 A/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor CC (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	135
Figura 5.21: Escala vertical: gerenciamento da energia da CaC em degraus (a) e detalhe da corrente na saída (b) e entrada (c) de carga. Pink: corrente da fase “b” do conversor CC (5 A/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor CC (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	136
Figura 5.22: Escala vertical: dinâmica do estágio CA com o gerenciamento da CaC. Aspecto geral (a) e detalhe da corrente da GD e rede (b) e (c). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (3 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (3 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	137
Figura 5.23: Corrente do estágio CA (a) e detalhe Corrente do estágio CA (b) para diferentes pontos de operação (simulação).	138

Figura 5.24: Escala vertical: tensão do estágio CA. Aspecto geral (a) e detalhe da tensão da GD (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (25 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (2,5 A/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (2,5 A/div). Escala horizontal: 40 ms/div (a) e 10 ms/div (b).	138
Figura 5.25: Tensão e corrente (10x) da rede de distribuição e GD com o gerenciamento da CaC (simulação).....	139
Figura 5.26: Escala vertical: tensão do link CC. Verde: tensão do link CC (2,5 V/div). Escala horizontal: 2 s/div.....	139
Figura 5.27: Tensão link CC para diferentes pontos de operação (simulação).....	140
Figura 6.1: Ilustração da área de potência para o gerenciamento do estágio CC.	144
Figura 6.2: Conversor bidirecional abaixador-elevador com o armazenador de energia. ...	145
Figura 6.3: Circuito do conversor bidirecional para a chave S_1 fechada.	146
Figura 6.4: Circuito do conversor bidirecional para a chave S_2 conduzindo.	148
Figura 6.5: Malha de controle da corrente do armazenador.	153
Figura 6.6: Resposta em frequência do controle de corrente do armazenador em malha aberta.	154
Figura 6.7: Ilustração da área de potência para a estratégia de gerenciamento no transitório.	155
Figura 6.8: Variáveis da geração distribuída empregadas na modelagem.	157
Figura 6.9: Malha de controle da tensão do link CC com a CaC e armazenador no estágio CC.	160
Figura 6.10: Ilustração da área de potência para a estratégia com compartilhamento em regime.....	162
Figura 6.11: Malha de controle da tensão do link CC com a CaC e armazenador operando no estágio CC com compartilhamento de potência.....	162
Figura 6.12: Comportamento do compartilhamento de potência com os ganhos k_s e k_{ps} associados ao erro de tensão.	164
Figura 6.13: Malha de controle da tensão do link CC considerando as plantas de corrente da CaC e do armazenador com compartilhamento de potência.....	165

Figura 6.14: Resposta em frequência para diferentes valores de k_s (a), detalhe da ressonância (b) e resposta em frequência para $k_s = 1$ e ciclo de trabalho médio igual a zero (c).	167
Figura 6.15: Mapa de polos e zeros para diferentes valores de k_s	168
Figura 6.16: Resposta ao degrau para diferentes de k_s (a) e (b) detalhe do sobressinal do degrau.	169
Figura 6.17: Resposta em frequência para diferentes valores de k_{ps}	169
Figura 6.18: Resposta ao degrau para diferentes valores de k_{ps} (a) e (b) detalhe do erro em regime.	170
Figura 6.19: Mapa de polos e zeros para diferentes valores de k_{ps}	171
Figura 6.20: Resposta em frequência (a) e ao degrau (b) para diferentes valores de tensão de entrada do armazenador com $k_{ps} = 10$	172
Figura 6.21: GD com compartilhamento de potência simulado e testado experimentalmente.	173
Figura 6.22: Escala vertical: inicialização da GD. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (10 A/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	173
Figura 6.23: Escala vertical: degrau de carga no PAC. Vermelho: tensão de entrada do armazenador (20 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (10 A/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	174
Figura 6.24: Degrau de carga no PAC (simulação).....	174
Figura 6.25: Escala vertical: detalhe da tensão e corrente do armazenador com o degrau de carga no PAC. Vermelho: tensão de entrada do armazenador (2 V/div). Laranja: corrente do armazenador (2,5 A/div). Escala horizontal: 1 s/div.	175
Figura 6.26: Escala vertical: detalhe da tensão e corrente da CaC com o degrau de carga no PAC. Azul: tensão da CaC (1 V/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.....	175

Figura 6.27: Escala vertical: somatório das potências do estágio CC, do armazenador e CaC. Azul escuro: somatório das potências total do estágio CC (300 W/div). Laranja: potência do armazenador (300 W/div). Roxo: potência da CaC (300 W/div). Escala horizontal: 2 s/div.	176
Figura 6.28: Equilíbrio de potências do estágio CC (azul escuro), do armazenador (laranja) e da CaC (roxo) (simulação).	176
Figura 6.29: Escala vertical: efeito no link CC. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Verde: potência no link CC (300 W/div). Roxo: corrente no link CC (2 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	177
Figura 6.30: Escala vertical: detalhe na tensão do link CC. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 1 s/div.	177
Figura 6.31: Transitórios na tensão do link CC (simulação).	178
Figura 6.32: Escala vertical: efeito no estágio CA. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (5 A/div). Azul: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (2 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	178
Figura 6.33: Escala vertical: detalhe do degrau no estágio CA. Azul: tensão da fase “a” da GD (25 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (1 A/div). Escala horizontal: 40 ms/div.	179
Figura 6.34: Escala vertical: compartilhamento em regime para $k_{ps} = 10$. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (5 A/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	179
Figura 6.35: Corrente da CaC e do armazenador com compartilhamento em regime para $k_{ps} = 10$ (simulação).	180
Figura 6.36: Escala vertical: compartilhamento em regime para $k_{ps} = 10$. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (5 A/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	180
Figura 6.37: Escala vertical: detalhe da tensão do link CC com compartilhamento em regime para $k_{ps} = 10$. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 2 s/div.	181

Figura 6.38: Tensão do link CC com compartilhamento em regime para $k_{ps} = 10$ (simulação).	182
Figura 6.39: Escala vertical: detalhe da tensão do link CC com compartilhamento em regime (a) para $k_{ps} = 5$ e (b) para $k_{ps} = 20$. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 2 s/div.	182
Figura 6.40: Escala vertical: inversão da corrente no armazenador. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (5 A/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	183
Figura 6.41: Escala vertical: degrau de carga com inversão da corrente no armazenador. Vermelho: tensão do de entrada do armazenador (20 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (5 A/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.	183
Figura 6.42: Escala vertical: somatório das potências do estágio CC, do armazenador e da CaC. Vermelho: somatório das potências total do estágio CC (300 W/div). Laranja: potência do armazenador (300 W/div). Roxo: potência da CaC (300 W/div). Escala horizontal: 2 s/div.	184
Figura 7.1: Tensão de saída do conversor em função da pressão de hidrogênio e do ciclo de trabalho médio.	190
Figura 7.2: Tensão de saída do conversor em função da resistência ôhmica e do ciclo de trabalho médio.	191
Figura 7.3: Tensão de saída do conversor em função da temperatura de operação da CaC e do ciclo de trabalho médio.	192
Figura 7.4: Variáveis da geração distribuída empregadas na modelagem proposta.	195
Figura 7.5: Malha de controle da tensão do link CC considerando a inicialização da CaC com curto-circuito nos seus terminais.	196
Figura 7.6: Comportamento do ganho escalonado em relação ao ganhos k_t e k_{ts} com o erro de tensão.	198
Figura 7.7: Resposta em frequência em malha fechada para diferentes valores de k_t .	198
Figura 7.8: Resposta ao degrau para diferentes valores de k_t .	199

Figura 7.9: Estrutura do estágio CC testada para o gerenciamento com curto-circuito nos terminais da CaC.....	200
Figura 7.10: Escala vertical: gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (5 A/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 5 s/div.....	201
Figura 7.11: Gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$. Verde: tensão do link CC (dividida por 5), Azul: tensão da CaC, Laranja: corrente do armazenador e Amarelo: corrente total do conversor da CaC (simulação).....	201
Figura 7.12: Escala vertical: detalhe do gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (5 A/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor da CaC (10 A/div) (a) e (5 A/div) (b). Escala horizontal: 500 ms/div.....	202
Figura 7.13: Gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$. Verde: tensão do link CC (dividida por 5), Azul: tensão da CaC, Laranja: corrente do armazenador e Amarelo: corrente total do conversor da CaC (simulação).....	203
Figura 7.14: Escala vertical: tensão no link CC no gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div.	204
Figura 7.15: Escala vertical: detalhe da tensão no link CC no gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 250 ms/div.	204
Figura 7.16: Tensão no link CC (dividida por 5) no gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$ (simulação).....	205
Figura 7.17: Escala vertical: tensão no link CC no gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 30$. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div.	205
Figura 7.18: Escala vertical: detalhe da tensão no link CC no gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 30$. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 500 ms/div.	206

Figura 8.1: Proposta para a inclusão do controle da corrente da rede de distribuição.	212
--	-----

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Classificação quanto aos tipos de CaCs [15].....	41
Tabela 2.2: $\Delta\bar{g}_f$ para a reação $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ [15].....	43
Tabela 2.3: $\Delta\bar{g}_f$, tensão de circuito aberto e limite de eficiência[15].....	45
Tabela 2.4: Modelo H-1000 (Horizon FC Technologies).	55
Tabela 2.5: Modelo H-1000 FCS-C1000.	56
Tabela 2.6: Parâmetros extraídos da CaC (retirada de corrente).	64
Tabela 2.7: Parâmetros extraídos da CaC (degrau de corrente).	66
Tabela 3.1: Parâmetros de projeto do controlador da CaC.....	78
Tabela 3.2: Parâmetros utilizados em simulação e experimental.	80
Tabela 4.1: Parâmetros de projeto do controlador de tensão do estágio CA.....	89
Tabela 4.2: Parâmetros de projeto do controlador de corrente do estágio CA.....	95
Tabela 4.3: Parâmetros de projeto do controlador do PLL.	99
Tabela 4.4: Parâmetros utilizados experimentalmente.	100
Tabela 5.1: Parâmetros de projeto do controlador de tensão do link CC.	125
Tabela 6.1: Parâmetros de projeto do controlador de corrente do armazenador.	154
Tabela 6.2: Parâmetros utilizados na análise em frequência.	166

Sumário

Capítulo 1	33
Motivação, objetivos do trabalho e organização do texto	33
1.1 Motivação.....	33
1.2 Objetivos da tese.....	35
1.3 Organização do texto	35
Capítulo 2	37
Célula a combustível	37
2.1 Princípio de funcionamento da CaC do tipo PEM.....	37
2.2 Tipos de CaCs.....	39
2.3 Tensão de circuito aberto e máxima eficiência.....	41
2.4 Modelagem da CaC do tipo PEM	46
2.4.1 Irreversibilidades da CaC.....	49
2.5 Descrição da CaC utilizada no experimento.....	53
2.6 Modelo da CaC.....	54
2.7 Inicialização da CaC	57
2.8 Dinâmica da CAC.....	59
2.9 Considerações finais do capítulo 2.....	67
Capítulo 3	69
Interface de potência – estágio CC-CC	69
3.1 Técnica <i>interleaved</i>	70
3.2 Conversor <i>interleaved</i> com multiplicador de tensão	72
3.3 Controladores para o conversor <i>interleaved</i>	77
3.4 Resultados experimentais	79
3.5 Considerações finais do capítulo 3.....	82

Capítulo 4.....	83
Interface de potência – estágio CC-CA.....	83
4.1 Configuração da GD empregada.....	84
4.2 Operação no modo ilhado	84
4.3 Controladores para o modo ilhado	88
4.4 Operação no modo conectado.....	91
4.5 Controladores para o modo conectado	94
4.6 Algoritmo de sincronização	96
4.7 Resultados para a GD baseada em CaC	99
4.7.1 Operação no modo ilhado	102
4.7.2 Operação no modo conectado	110
4.8 Considerações finais do capítulo 4	114
Capítulo 5.....	117
Gerenciamento da energia da CaC	117
5.1 Gerenciamento da CaC para o modo conectado	120
5.1.1 Modelagem da tensão do link CC.....	122
5.1.2 Controladores de tensão do link CC	124
5.2 Resultados do gerenciamento da CaC para o modo conectado.....	126
5.2.1 Gerenciamento do ponto de operação.....	132
5.3 Gerenciamento da CaC para o modo ilhado	140
5.4 Considerações finais do capítulo 5	141
Capítulo 6.....	143
Gerenciamento da energia da CaC com armazenadores de energia	143
6.1 Conversor bidirecional empregado	145
6.1.1 Controlador do conversor bidirecional.....	152
6.2 Gerenciamento da energia da CaC e armazenador no transitório	154
6.3 Gerenciamento da energia da CaC e do armazenador em regime	161
6.4 Análise dinâmica para a estratégia de gerenciamento	165
6.5 Resultados do gerenciamento da CaC e armazenador.....	172
6.6 Considerações finais do capítulo 6	184
Capítulo 7.....	187
Inicialização da CaC.....	187

7.1	Impacto das variáveis da CaC na tensão produzida pelo conversor	188
7.2	Curto-circuito nos terminais de saída da CaC	192
7.3	Estratégia de gerenciamento para a inicialização da célula	194
7.4	Resultados do gerenciamento com curto-circuito nos terminais da CaC	199
7.5	Considerações finais do capítulo 7	206
Capítulo 8		209
	Conclusões	209
8.1	Principais contribuições da tese	210
8.2	Sugestões para a continuidade do trabalho	211
8.3	Trabalhos publicados	212
8.3.1	Trabalhos publicados em periódicos	212
8.3.2	Trabalhos completos publicados em anais de eventos	213
	Referências bibliográficas	216
	Anexos	222
	Anexo A	223
	Resultados da CaC fornecidos pelo fabricante	223
	Anexo B	226
	Hidratação da membrana polimérica	226
	Anexo C	228
	Folha de dados do inversor	228
	Anexo D	232
	Esquemático da placa de medição de corrente	232
	Anexo E	234
	Esquemático da placa de medição de tensão	234
	Anexo F	236
	Fotos da bancada experimental	236

Capítulo 1

Motivação, objetivos do trabalho e organização do texto

1.1 Motivação

A aparição de um cenário de dificuldades no atendimento da demanda de energia elétrica a partir de 2001 em decorrência de fatores como a limitada produção de energia por grandes centrais hidroelétricas, a inviabilidade econômica e, principalmente, os efeitos ambientais causados com a implantação de novas centrais hidroelétricas, fez com que o risco de desabastecimento no setor elétrico nacional aumentasse [1].

Não obstante, como consequência de uma elevada concentração de fontes hídricas em sua matriz energética, a matriz energética brasileira é concebida no sentido de aproveitar ao máximo os recursos hídricos do país. Entretanto, a redução nos níveis dos reservatórios entre os anos de 2014 e 2015 implicaram em uma necessidade de acionar as usinas termelétrica, as quais elevaram o custo da produção de energia elétrica e, da mesma forma, aumentaram a emissão de CO₂.

Em vista disso, a geração distribuída (GD), decorrente do uso de fontes alternativas, é incentivada por órgãos como a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e Ministério de Minas e Energia através do programa PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) com a finalidade de promover soluções para os problemas de fornecimento de energia [2].

Em se tratando de células a combustível, o ProCaC (Programa Brasileiro de Sistemas de Células a Combustível), instituído em 2002 e denominado ProH₂ em 2005, tem como

objetivo central o desenvolvimento de tecnologias para a produção de hidrogênio e dispositivos que utilizam célula a combustível (CaC) como fonte primária no Brasil.

Especificamente para células a combustível, em [3] é descrito que um dos mercados promissores para aplicações de células a combustível no Brasil é o de geração distribuída, com potencial de geração entre 5 e 200 kW, visando atender consumidores de energia elétrica como as empresas de energia e de telecomunicações, centros de pesquisas, hospitais, aeroportos e etc.

Neste sentido, grande parte da pesquisa brasileira associada às CaCs está direcionada ao desenvolvimento de membranas alternativas ao Nafion[®], produção de hidrogênio a partir de energias renováveis e catalisadores para oxidação direta do etanol (CaCs a etanol) entre outros. Dentro do contexto da geração distribuída, observa-se três plantas de 200 kW coordenadas pelo LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento) em parceria com a COPEL (Companhia Paranaense de Energia) implantadas em 2002, cujo principal foco está centrado no domínio tecnológico, no aproveitamento do calor gerado e a própria avaliação da GD [4].

Já no âmbito acadêmico, no qual estão relacionadas às interfaces que associam conversores eletrônicos às células a combustível, podem ser citados trabalhos como [5-11]. Em [5] é apresentada uma análise sobre a interação do conversor CC-CC com a CaC. No trabalho, é proposto um filtro “T” associado ao conversor CC-CC de forma a atenuar as oscilações na CaC. Em [7] é realizado um estudo associado ao gerenciamento da climatização da CaC visando a eficiência energética. Os resultados apresentam a operação da CaC isoladamente e a proposta é validada com uma carga variável nos terminais da célula.

Ao mesmo tempo, em [9] é apresentada as características elétricas das CaCs com o desenvolvimento de um modelo para simulação numérica com foco nas grandezas elétricas, além do desenvolvimento de arquiteturas de conversores CC-CC para a conversão de energia das CaCs. Em outro contexto, em [11] é apresentado um estudo para modelagem de empilhamentos de células a combustível considerando a CaC como um sistema variante no tempo.

Do exposto acima, observa-se espaço e impactos positivos para o estudo e desenvolvimento de trabalhos em pesquisa científica com as CaCs inseridas no contexto de geração distribuída, de forma a avaliar os seus limites operativos, restrições e seu comportamento dinâmico.

1.2 Objetivos da tese

Este trabalho possui como objetivo geral o desenvolvimento e a análise de uma planta de geração distribuída que opera tanto ilhada quanto conectada à rede de distribuição e que possui como fonte principal uma célula a combustível do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*). Neste sentido, são propostas estruturas de gerenciamento e controle que permitem reduzir o efeito do transitório de carga sobre a CaC e os efeitos relacionados com a operação em uma geração distribuída.

Os objetivos específicos estão listados abaixo:

- ✓ Desenvolver uma estrutura de GD, de forma que a CaC possa operar em diferentes pontos da curva de polarização (*v versus i*), permitindo o gerenciamento da energia fornecida pela célula;
- ✓ Projetar estruturas de gerenciamento e controle, que sejam capazes de reduzir transitórios na CaC associados a manobras de carga e contingências provenientes do estágio CA;
- ✓ Considerando a CaC como fonte principal, sintetizar corrente e tensão senoidais e equilibradas no ponto de acoplamento comum (PAC) da GD;

1.3 Organização do texto

Ao longo do texto, a tese é exposta da seguinte forma:

O capítulo 2 introduz os conceitos fundamentais sobre as CaCs e o desenvolvimento do modelo analítico utilizado em laboratório. Além disso, discorre sobre os desafios encontrados na sua inicialização e sobre o seu modelo dinâmico.

O capítulo 3 apresenta o estágio CC e suas principais características. Estão contidos o modelo matemático empregado, bem como as estruturas de controle utilizadas para o controle da corrente e tensão de saída da CaC.

O capítulo 4 traz a estrutura inicial do estágio CA empregada na GD. A estratégia de controle para ambos os modos de operação (conectado e ilhado) do estágio CA, assim como a estrutura do algoritmo de sincronização são exemplos de assuntos abordados neste capítulo.

O capítulo 5 inicia a discussão em torno do gerenciamento do ponto de operação da CaC. Neste capítulo, a estratégia concentra-se no modo de operação conectado à rede de distribuição.

O capítulo 6 introduz o armazenador de energia ao estágio CC e discute o gerenciamento da CaC para o modo de operação ilhado. Além disso, é apresentada uma estratégia que, além de proteger a CaC de transientes, é capaz de compartilhar a potência produzida pela CaC e pelo armazenador em regime permanente e em transientes de carga.

O capítulo 7 traz uma proposta para a inicialização da célula. Neste capítulo é proposta uma estrutura capaz de viabilizar a técnica de curtos-circuitos cíclicos na entrada da CaC para o seu aquecimento.

O capítulo 8 conclui o trabalho, sendo apresentadas as principais contribuições e as respectivas atividades para o seu prosseguimento.

Capítulo 2

Célula a combustível

CaC's do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) são células a combustível que possuem hidrogênio e oxigênio como combustíveis e que, como resultado da sua reação eletroquímica, produzem eletricidade, calor e água. Como a CaC do tipo PEM é a fonte de energia principal deste trabalho, este capítulo se dedica a uma breve introdução das suas principais características.

Assim, neste capítulo são descritos os princípios básicos de funcionamento das células a combustível do tipo PEM, os diferentes tipos de CaCs e uma revisão acerca da eficiência e da tensão de circuito aberto para este tipo de célula. Além disso, é apresentada a célula a combustível empregada no desenvolvimento do protótipo, bem como seu funcionamento e características.

No decorrer deste capítulo, é apresentado o modelo matemático da CaC associando a dinâmica da célula utilizada em simulação e aquela empregada nos testes experimentais. De forma a introduzir a CaC utilizada no protótipo, uma descrição da célula é realizada e, por fim, os resultados experimentais para a obtenção da dinâmica da CaC são analisados e discutidos neste capítulo.

2.1 Princípio de funcionamento da CaC do tipo PEM

A estrutura da CaC do tipo PEM é descrita como sendo dois eletrodos, um o ânodo e o outro o cátodo, separados por uma membrana polimérica sólida que atua como eletrólito, sendo a membrana polimérica Nafion® utilizada em grande parte das CaCs comerciais.

O hidrogênio flui por meio de canais para o ânodo, onde é dissociado em prótons que atravessam a membrana até o cátodo e em elétrons que circulam no circuito externo como corrente elétrica ligando os dois eletrodos como ilustra a reação (2.1). O oxidante (ar ou oxigênio) flui por canais similares ao cátodo onde se combina com os elétrons provenientes do circuito externo e com os prótons que fluem através da membrana como mostra a reação (2.2). Esta combinação resulta em água, eletricidade e calor como apresentado na reação completa da CaC em (2.3) [12].

A Figura 2.1 representa o funcionamento de uma célula unitária. Para aplicações com níveis de potência elevadas em GD, por exemplo, se faz necessária à conexão de células em série a fim de se obter uma tensão de saída com níveis compatíveis aos da rede elétrica (entende-se por níveis compatíveis valores na ordem de 40 V, o que torna necessário o uso de conversores CC-CC e CC-CA para adequar os níveis de tensão nos terminais da célula aos valores da rede de distribuição). Esta conexão de células em série é comumente denominada na literatura como “pilha” de células e está representada na Figura 2.2.

Figura 2.1: Ilustração do funcionamento de uma célula unitária. Adaptada de [13].

Figura 2.2: Ilustração de uma pilha de CaCs em série. Adaptada de [14].

2.2 Tipos de CaCs

Uma variedade de CaCs estão em diferentes estágios de desenvolvimento e são classificadas de acordo com o combustível e o eletrólito utilizado, que por sua vez, determina a temperatura de operação da célula. A classificação mais comum das células é pelo tipo de eletrólito utilizado e isso inclui: *Próton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), *Alkaline Fuel Cell* (AFC), *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), *Solid Oxid Fuel Cell* (SOFC) e *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC).

Proton Exchange Membrane Fuel Cell- PEMFC

Células a combustível do tipo PEM operam em temperaturas baixas quando comparadas a outros tipos de CaCs (30 a 100°C). Além disso, utilizam um fino eletrólito sólido condutor de íons, possuindo a vantagem de ter maior densidade de corrente e corrosão reduzida. A baixa temperatura de operação dessas células garante uma resposta dinâmica mais rápida quando comparada com as demais tecnologias de CaCs. Por ser uma célula de fabricação e utilização conhecidas, disponibilidade comercial e temperatura de operação baixa, a célula do tipo PEM foi a escolhida como fonte principal nesse trabalho.

Um dos inconvenientes para as células do tipo PEM é o fato de exigirem catalisadores de platina, porém o avanço no desenvolvimento deste tipo de célula nos últimos anos permitiu a redução da utilização da quantidade de platina e, portanto, o custo correspondente [15-17].

Alkaline Fuel Cells - AFC

Operam com temperaturas entre 50 a 200°C, sendo o eletrólito uma solução aquosa de hidróxido de potássio alcalino que aumenta a velocidade da reação no cátodo e o desempenho da CaC. As células a combustível do tipo AFC obtiveram um maior alcance por terem sido utilizadas no programa espacial Apollo, o qual levou o homem à lua. Devido ao sucesso da missão, foi possível desenvolvê-la em diferentes aplicações como tratores para o manejo agrícola, veículos automotivos, equipamentos para navegação e etc [15-17].

Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC

Tipicamente trabalham com temperaturas entre 150 a 220°C e possuem ácido fosfórico como eletrólito. Além de possuírem platina como catalisador, a *PAFC* tem uma baixa densidade de corrente o que limita a sua aplicação [15-17].

Solid Oxid Fuel Cell - SOFC

Este tipo de CaC opera com temperaturas entre 600 a 1000°C e possuem como eletrólito um material cerâmico de óxido de zircônia com uma pequena quantidade de ítria. Por trabalharem com elevadas temperaturas, a cogeração é utilizada de forma a elevar a eficiência deste tipo de célula. Contudo, problemas associados à vida útil da CaC decorrente da operação em alta temperatura impactam negativamente na sua utilização [15-17].

Direct Methanol Fuel Cell - DMFC

Operam com temperaturas entre 50 a 100°C. Semelhantes as CaCs do tipo PEM, usam uma membrana de polímero como eletrólito, sendo que o catalisador do ânodo retira o hidrogênio do metanol líquido diretamente, tornando desnecessário a utilização de um reformador. Atualmente despertam grande interesse no campo da pesquisa devido a sua baixa emissão de poluentes, design compacto e facilidade de abastecimento [18].

A Tabela 2.1 sumariza as características operativas para as CaCs descritas acima.

Tabela 2.1: Classificação quanto aos tipos de CaCs [15].

Tipo de CaC	Temperatura (°C)	Potência (W)	Eficiência (%)
PEMFC	30 - 100	50 – 250k	48 – 60
AFC	50 - 200	0,3 – 5k	50 – 60
PAFC	150 - 220	10k – 1M	55
SOFC	600 - 1000	1k – 10M	55 – 65
DMFC	50 - 100	1k – 10k	50 – 60

2.3 Tensão de circuito aberto e máxima eficiência

Quando comparada com outros processos de conversão de energia, as CaCs apresentam uma elevada eficiência de conversão (Tabela 2.1). Este fato está associado ao modo como a conversão ocorre. Considerando máquinas elétricas rotativas que transformam, de forma geral, energia mecânica em elétrica, pode-se observar no seu processo de conversão perdas associadas ao atrito dos rolamentos, ar e etc. Por outro lado, a conversão de energia nas CaCs ocorre através de reações eletroquímicas sem etapas de conversões intermediárias. A Figura 2.3 apresenta as entradas e saídas do processo de conversão de uma CaC do tipo PEM.

Figura 2.3: Entradas e saídas do processo de conversão de energia da CaC.

Para analisar a conversão de energia em todo o processo químico envolvido na operação de uma CaC, é preciso definir a energia livre de Gibbs. Por definição, a energia livre de Gibbs é a máxima energia elétrica disponível no processo de conversão de energia. Desta forma, é útil calcular a variação da energia livre de Gibbs de formação molar. Esta variação determina a energia liberada durante o processo de conversão química, sendo a variação da energia livre de Gibbs definida em (2.4) [15-17].

$$\Delta G_f = \Delta G_{f_produtos} - \Delta G_{f_reagentes} \quad (2.4)$$

Considerando a notação em unidades “por mol”, a equação (2.4) toma a forma encontrada em (2.5).

$$\Delta \bar{g}_f = \bar{g}_{f_produtos} - \bar{g}_{f_reagentes} \quad (2.5)$$

Analisando a reação entre hidrogênio e oxigênio de uma célula a combustível, tem-se (2.6).

Sendo equivalente a reação (2.7).

Ponderando a reação (2.7), o produto da reação é um mol de H_2O enquanto que, os reagentes devem perfazer um mol de H_2 e meio mol de O_2 . Deste modo, pode-se ilustrar a variação da energia livre de Gibbs para a reação (2.7) por (2.8).

$$\Delta \bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(\bar{g}_f)_{O_2} \quad (2.8)$$

Contudo, a variação da energia livre de Gibbs de formação molar não é constante e varia conforme a temperatura e o estado do produto (líquido ou gasoso). A Tabela 2.2 apresenta a energia livre de Gibbs para a reação (2.7) em diferentes temperaturas e estado (líquido ou gasoso). Observa-se que, por convenção, os valores negativos para a energia livre de Gibbs representam a liberação de energia.

Assim, para determinar a tensão de circuito aberto da CaC é necessário supor que o seu processo de conversão seja reversível, ou seja, que a CaC não apresente perdas em seu processo de conversão de energia. Considerando o funcionamento da CaC do tipo PEM, dois elétrons passam através do circuito externo para cada molécula de água produzida e para cada

molécula de hidrogênio utilizado. Com isso, para um mol de hidrogênio, $2N$ elétrons passam através do circuito externo da CaC, onde N é o número de Avogrado¹. Assim, para um mol de hidrogênio a carga que flui pelo circuito externo é dada por (2.9) [15-17].

$$q = -2Ne = -2F \quad (2.9)$$

onde:

q : carga elétrica (C);

F : constate de Faraday, equivalente a carga em um mol de elétrons (C/mol);

e : carga de um elétron.

Com isso, o trabalho elétrico realizado pela CaC para mover dois elétrons através do circuito pode ser expresso por (2.10).

$$\text{Trabalho elétrico} = \text{carga elétrica} \times \text{tensão} = -2FE \quad \text{Joules} \quad (2.10)$$

Sendo E a tensão da CaC.

Tabela 2.2: $\Delta \bar{g}_f$ para a reação $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ [15].

Estado do produto	Temperatura (°C)	$\Delta \bar{g}_f$ (kJmol ⁻¹)
Líquido	25	-237,2
Líquido	80	-228,2
Gasoso	80	-226,1
Gasoso	100	-225,2
Gasoso	200	-220,4
Gasoso	400	-210,3
Gasoso	600	-199,6
Gasoso	800	-188,6
Gasoso	1000	-177,4

¹ O número de Avogrado representa a quantidade de moléculas existentes em um mol de qualquer substância.

Desta forma, considerando o sistema reversível, ou seja, um sistema que não apresenta perdas no processo de conversão de energia e que a energia livre de Gibbs seja a máxima energia elétrica disponível, pode-se afirmar que o trabalho elétrico é igual à energia livre de Gibbs liberada. Assim, é possível obter (2.11) [15-17].

$$\Delta \bar{g}_f = -2FE \quad (2.11)$$

Finalmente, rearranjando a equação (2.11) obtém-se a tensão reversível de circuito aberto para a CaC do tipo PEM (2.12).

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F} \quad (2.12)$$

Por outro lado, para definir a eficiência em uma CaC, compara-se a energia elétrica produzida com o calor produzido pela reação do combustível utilizado [15]. Esta quantidade de calor é definida como a mudança na entalpia de formação molar $\Delta \bar{h}_f$. Assim, a eficiência da célula é definida como sendo (2.13).

$$\frac{\text{Energia elétrica produzida por mol de combustível}}{-\Delta \bar{h}_f} \quad (2.13)$$

Ainda neste contexto, é necessário considerar que existem dois valores para a mudança na entalpia de formação molar $\Delta \bar{h}_f$, os quais dependem do estado do seu produto, que pode ser líquido (*HHV-higher heating value*) ou gasoso (*LHV-lower heating value*).

No seu estado líquido têm-se os valores expressos em (2.14).

$$\Delta \bar{h}_f = -285,84 \left(\text{kJ mol}^{-1} \right)$$

Já no seu estado gasoso os valores são dados por (2.15).

$$\Delta \bar{h}_f = -241,83 \text{ (kJ mol}^{-1}\text{)}$$

Desta forma, a eficiência máxima possível para a CaC pode ser definida pela expressão (2.16).

$$\text{Máxima eficiência} = \frac{\Delta \bar{g}_f}{\Delta \bar{h}_f} 100\% \quad (2.16)$$

O limite máximo de eficiência da CaC, apresentada em (2.16), também é conhecido na literatura como “eficiência termodinâmica”. A Tabela 2.3 apresenta a tensão de circuito aberto e o limite de eficiência considerando como produto a água no seu estado líquido (HHV).

Ainda em relação à eficiência da CaC, de forma a simplificar o seu cálculo, é possível obter uma relação entre a tensão de circuito aberto e sua máxima eficiência. Para isso, é preciso considerar que toda a energia proveniente do hidrogênio seja transformada em energia elétrica, o que resultaria na relação dada por (2.17) [15-17].

Tabela 2.3: $\Delta \bar{g}_f$, tensão de circuito aberto e limite de eficiência[15].

Estado do produto	Temperatura (°C)	$\Delta \bar{g}_f$ (kJmol ⁻¹)	E (V)	Limite de eficiência (%)
Líquido	25	-237,2	1,23	83
Líquido	80	-228,2	1,18	80
Gasoso	100	-225,2	1,17	79
Gasoso	200	-220,4	1,14	77
Gasoso	400	-210,3	1,09	74
Gasoso	600	-199,6	1,04	70
Gasoso	800	-188,6	0,98	66
Gasoso	1000	-177,4	0,92	62

$$E = \frac{-\Delta \bar{h}_f}{2F}$$

(2.17)

$$= 1,48, \text{ para } HHV$$

$$\text{ou } = 1,25, \text{ para } LHV$$

Esses valores de tensão apresentados em (2.17) são obtidos para uma operação com 100% de eficiência. Assim, uma forma para a obtenção da eficiência da CaC do tipo PEM pode ser dada pela relação da tensão medida nos terminais da CaC e a tensão para uma eficiência de 100%. A simplicidade da equação (2.18) traz uma forma direta para a obtenção da eficiência da CaC.

$$Eficiência = \frac{v_{CaC}}{1,48} 100\%, \text{ para } HHV$$

(2.18)

2.4 Modelagem da CaC do tipo PEM

Em termos práticos, o processo de conversão de energia realizado pela CaC não disponibiliza em seus terminais a tensão de circuito aberto definida pela equação (2.12). Isso porque não são consideradas as irreversibilidades presentes no processo de conversão e as influências da pressão e da temperatura na sua modelagem. A inclusão da pressão dos gases e da temperatura de operação da CaC leva a obtenção da tensão de Nernst, a qual é apresentada nesta seção.

Equação de Nernst

Nas discussões anteriores, destacou-se que em uma reação química a variação da energia livre de Gibbs modifica-se conforme a temperatura, sendo que a Tabela 2.3 mostra estes valores. Não obstante, a energia livre de Gibbs varia também com a pressão da reação.

Considerando a reação genérica (2.19) introduzida por [15], onde a_j moles de **J** reagem com k moles de **K**, de forma a produzir m moles de **M**. Cada um dos reagentes e

produtos tem uma “atividade” associada, conforme descreve [15]. Esta “atividade” é descrita pelo termo a , sendo a “atividade” dos reagentes e dos produtos descritas por a_j e a_k , respectivamente.

Considerando que os gases tenham um comportamento ideal, pode-se definir a “atividade” como sendo a relação entre a pressão parcial dos gases P e a pressão padrão P^0 . Assim sendo, a “atividade” de a é dada por (2.20).

$$\text{atividade } a = \frac{P}{P^0} \quad (2.20)$$

Desta forma, segundo [15], é possível generalizar a equação (2.20) e considerar que para vapor de água, por exemplo, tem-se (2.21).

$$a_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P^0_{H_2O}} \quad (2.21)$$

Para o caso do produto H_2O estar no estado líquido, uma aproximação adequada é considerar que $a_{H_2O} = 1$, conforme discutido em [15-17].

Assim, levando em consideração que a “atividade” dos reagentes e dos produtos modifica a energia livre de Gibbs de uma reação, pode ser mostrado que a energia livre de Gibbs da reação química genérica apresentada em (2.4) pode ser expressa conforme (2.22).

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^0 - RT \ln \left(\frac{a_{\mathbf{J}}^j a_{\mathbf{K}}^k}{a_{\mathbf{M}}^m} \right) \quad (2.22)$$

Sendo $\Delta \bar{g}_f^0$ a variação na energia livre de Gibbs de formação dada em condições padrão de pressão.

De forma análoga ao obtido, genericamente, a partir da reação (2.19), com a reação da CaC de hidrogênio representada em (2.7), pode-se concluir que a energia livre de Gibbs para a reação da CaC do tipo PEM possui a forma expressa por (2.23).

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^0 - RT \ln \left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right) \quad (2.23)$$

Estando a parcela $\Delta \bar{g}_f^0$ dada na Tabela 2.3.

A partir de (2.23), pode-se associar a “atividade” dos produtos e dos reagentes com a energia livre de Gibbs. Por exemplo, na medida em que aumenta a “atividade” dos reagentes, que está associada à pressão do reagente, um maior volume de energia é liberado. Por outro lado, aumentando a “atividade” do produto da reação, uma menor quantidade de energia é liberada.

De tal modo, para a análise do comportamento da pressão dos gases na tensão da CaC, basta substituir na equação (2.23) a tensão de circuito aberto demonstrada em (2.12), obtendo-se, portanto, a expressão (2.24).

$$\begin{aligned} E &= -\frac{\Delta \bar{g}_f^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right) \\ &= E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Assim, obtém-se a equação conhecida como tensão de Nernst, a qual relaciona a tensão ideal (E^0) na pressão padrão com a dinâmica da “atividade” dos reagentes a certa pressão e temperatura.

Por fim, de forma semelhante ao discutido em (2.21), a “atividade” dos reagentes e do produto de uma CaC do tipo PEM pode ser expresso conforme (2.25).

$$a_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P^0}, \quad a_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P^0}, \quad a_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P^0} \quad (2.25)$$

Portanto, a equação (2.24) torna-se (2.26).

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\frac{P_{H_2}}{P^0} \left(\frac{P_{O_2}}{P^0} \right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{P_{H_2O}}{P^0}} \right) \quad (2.26)$$

Se as pressões são dadas em atm, então $P^0 = 1$ e, portanto, a equação que define a tensão de Nernst pode ser dada por (2.27).

$$E_{Nernst} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} (P_{O_2})^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (2.27)$$

Onde:

E_{Nernst} : tensão de Nernst (V);

E^0 : tensão ideal de circuito aberto (V);

R : constante universal dos gases (J/mol.K);

T : temperatura de operação da CaC (K);

P_{H_2} : pressão parcial de hidrogênio no ânodo (atm);

P_{O_2} : pressão parcial de oxigênio no cátodo (atm).

2.4.1 Irreversibilidades da CaC

Apresentada a tensão teórica para a CaC e a tensão de Nernst, que insere no seu equacionamento a influência da temperatura e das pressões parciais dos gases, surge a necessidade de avaliar um modelo que forneça a tensão nos terminais da célula. A tensão disponível em seus terminais é obtida pelo somatório da tensão de Nernst e de três irreversibilidades, ou quedas de tensão, as quais são denominadas:

-
- ✓ Queda de tensão por perdas de ativação ou polarização de ativação (v_{at});
 - ✓ Queda de tensão por perdas ôhmicas ou polarização ôhmica ($v_{\hat{ohmico}}$);
 - ✓ Queda de tensão por transporte de massa (v_{trans}).

Perdas por ativação

As perdas por ativação representam a energia inicial necessária para a quebra das moléculas de hidrogênio e oxigênio nos eletrodos da CaC. Na prática, essa perda está associada a uma queda de tensão nos terminais da célula e é mais acentuada em baixas correntes.

O modelo matemático para as perdas na região de ativação parte da equação de Tafel, que a partir de resultados experimentais observou que a tensão na superfície de um eletrodo segue um padrão similar para diversas reações eletroquímicas [15-17]. Assim, para a maior parte das reações eletroquímicas, a tensão na superfície de um eletrodo é dada pela equação (2.28).

$$v_{at} = a \log \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.28)$$

Onde:

a : constante de inclinação da curva;

i : corrente da CaC (A);

i_0 : corrente de troca (A) - valor da corrente no início da queda de tensão por ativação.

A equação (2.28) é conhecida como equação de Tafel e pode ser expressa de diferentes formas, inclusive usando logaritmo natural ao invés de logaritmos na base 10, apesar da necessidade de inclusão da constante A conforme expresso em (2.29).

$$v_{at} = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.29)$$

Embora a equação de Tafel tenha sido obtida experimentalmente, é mostrado em [15] que para CaCs do tipo PEM a constante A pode ser representada por (2.30).

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (2.30)$$

A constante α é conhecida como coeficiente de transferência de carga, sendo proporcional a energia utilizada para alterar a velocidade de uma reação eletroquímica. O valor da constante α varia entre 0 e 1, sendo que para CaCs do tipo PEM no ânodo $\alpha=0,5$ e no cátodo $\alpha=0,1$ a $0,5$ [15-17].

Em uma primeira análise, o aumento da temperatura em (2.29) indica um aumento nas perdas por ativação, contudo um aumento na temperatura produz um maior impacto na redução da corrente de troca, o que, globalmente, reduz as perdas por ativação.

Perdas ôhmicas

As perdas ôhmicas estão relacionadas com a resistência ao fluxo de íons no eletrólito e aos elétrons no eletrodo. Pode-se dizer que essas perdas são, aproximadamente, lineares na região central da curva e são dadas pela equação (2.31).

$$v_{\text{ohmico}} = i_{\text{CaC}} (R_M + R_C) \quad (2.31)$$

Onde:

R_M : resistência da membrana (Ω);

R_C : resistência dos contatos (Ω).

A resistência da membrana à passagem de íons é expressa pela equação (2.32).

$$R_M = \frac{\rho_M L}{A_{\text{CaC}}} \quad (2.32)$$

Onde:

ρ_M : resistividade da membrana (Ωcm);

L : espessura da membrana (cm);

A_{CaC} : área ativa da célula (cm^2).

Perdas por transporte de massa

As perdas por transporte de massa ou de concentração estão associadas com a circulação dos gases através dos dutos presentes no interior da CaC, as quais afetam as concentrações de hidrogênio e oxigênio sobre a membrana e causam uma diminuição das pressões parciais destes gases. Além disso, as perdas por transporte de massa dependem da corrente elétrica e são mais acentuadas em correntes elevadas, como se observa na Figura 2.4. A equação (2.33) descreve a queda de tensão por transporte de massa, sendo i_l o valor de corrente no início da queda de tensão por transporte de massa.

$$v_{trans} = -\frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right) \quad (2.33)$$

O termo $RT/2F$ pode variar de acordo com o tipo de reagente, por exemplo, para o oxigênio o valor é de $RT/4F$ conforme [15-17]. Desta forma, é conveniente expressar as perdas por transporte de massa através da equação (2.34). A diferença reside no termo B , que pode ser interpretado como sendo uma constante que depende dos reagentes e de seu estado de operação.

$$v_{trans} = -B \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right) \quad (2.34)$$

Tensão terminal da CaC

Por fim, considerando os processos irreversíveis de uma CaC, associados a tensão de Nernst apresentada em (2.27), a tensão de saída da célula pode ser dada pela seguinte relação (2.35).

$$v_{CaC} = E_{Nernst} - v_{at} - v_{ohmico} - v_{trans} \quad (2.35)$$

O primeiro termo da equação (2.35) representa a tensão de Nernst que leva em conta a tensão de circuito aberto e a influência da temperatura e da pressão dos gases, enquanto os

três últimos termos representam as quedas de tensões intrínsecas de uma célula. O balanço em (2.35) resulta na tensão útil de saída da CaC para uma determinada corrente de operação. A Figura 2.4 mostra a curva de polarização (v versus i) teórica da CaC, relacionando a tensão e a corrente da célula e representando as quedas de tensão causadas pelas três irreversibilidades.

Figura 2.4: Curva teórica de polarização (v versus i) de uma CaC.

Através da ilustração da curva teórica de polarização da Figura 2.4 observa-se que, mesmo na condição de circuito aberto, a tensão da CaC não possui o mesmo valor da tensão de Nernst. Esta redução da tensão está associada, ainda que em pequenas quantidades, ao cruzamento de combustível diretamente pela membrana. Esse fenômeno é conhecido como *fuel crossover* e ocorre quando parte do combustível (hidrogênio) reage diretamente com o oxigênio sem produzir corrente pelo circuito externo da célula. O impacto deste fenômeno aparece como uma queda de tensão nos terminais da CaC.

2.5 Descrição da CaC utilizada no experimento

A CaC utilizada em laboratório é fabricada pela Horizon Fuel Cell Technologies e é do tipo cátodo aberto como ilustra a Figura 2.5. Nesse tipo de arquitetura não há uma entrada dedicada de oxigênio, mas sim uma entrada no cátodo com fluxo de ar controlado pelo gerenciador da própria célula, através da velocidade dos ventiladores. Ao mesmo tempo, a CaC é do tipo ânodo fechado com a saída do excesso de hidrogênio controlada por uma válvula solenoide (purga) acionada em um intervalo pré-determinado pelo seu gerenciador.

A temperatura de operação da célula é controlada pelo seu gerenciador, sendo que para temperaturas maiores que 65°C a célula é desligada. O controle é realizado através da velocidade dos ventiladores e se confunde com o controle do fluxo de ar necessário na entrada do cátodo para a reação da CaC.

Além disso, a célula foi construída com uma chave semicondutora (Sc) posicionada em paralelo em relação aos terminais de saída da CaC, a qual realiza curtos-circuitos por um período de tempo pré-determinado. O emprego deste curto-circuito nos terminais da CaC está associado com a dinâmica lenta de inicialização da célula e será discutido com maiores detalhes no capítulo 7.

Por não ter uma entrada de oxigênio dedicada, a eficiência da CaC é impactada negativamente. Porém, com o cátodo aberto, o custo de produção de energia elétrica é reduzido e a sua operação é facilitada em termos de números de equipamentos necessários ao funcionamento da CaC.

Figura 2.5: Descrição funcional da CaC.

2.6 Modelo da CaC

Nesta seção, desenvolve-se o modelo analítico utilizado em simulação para representar a CaC empregada no protótipo experimental. Dependendo do grau de precisão que se deseja alcançar com o modelo matemático, o nível de conhecimento necessário em eletroquímica e termodinâmica pode ser considerável. Considerando todos os fenômenos que ocorrem no

processo de conversão de energia de uma CaC, como por exemplo, transferência de prótons, reações de oxidação e redução no catalisador, etc. Portanto, um modelo exato necessitaria ser desenvolvido em um ambiente multidisciplinar.

Dentro do contexto deste trabalho, objetiva-se um modelo que represente a dinâmica da CaC para que seja possível processar a energia disponibilizada pela célula e validar as contribuições deste trabalho em cenários comparativos entre simulação e resultados obtidos experimentalmente. A CaC utilizada no projeto é do modelo H-1000, sendo auto umidificada e possuindo como reagentes de entrada o hidrogênio e ar. A Tabela 2.4 apresenta as principais características do modelo.

Tabela 2.4: Modelo H-1000 (Horizon FC Technologies).

Parâmetro	Valor
Número de células	48
Potência máxima	1000 (W)
Desempenho	28,8 (V) @ 35(A)
Máx. Temperatura de operação	65 (°)
Pressão entrada hidrogênio	0,45-0,55 (bar)
Umidificação	Auto umidificada
Consumo de hidrogênio	13 (L/min)
Eficiência	40% @ 28,8V

O modelo desenvolvido para representar a CaC é generalizado, pois leva em consideração a área e espessura do eletrólito, a resistência ôhmica, a densidade de corrente e a sua densidade de corrente de troca. O modelo possui como entradas a pressão e vazão de hidrogênio e a temperatura de operação da CaC, enquanto que a saída é composta pela tensão, corrente e potência da célula. Os dados referentes à membrana polimérica são apresentados na Tabela 2.5 e foram disponibilizados pelo fabricante Horizon Fuel Cell.

A Figura 2.6 (a) ilustra a curva de polarização fornecida pelo fabricante do modelo H-1000 versus o resultado obtido com o modelo construído em linguagem C e simulado no software PSIM[®]. Observa-se que tanto na região que ilustra as perdas resistivas quanto na região por transporte de massa, o modelo apresenta um comportamento semelhante aquele obtido pelo fabricante experimentalmente.

Contudo, na região de ativação o modelo apresenta um erro máximo em torno de 3% em relação ao resultado experimental. Tais divergências estão ligadas a limitação do modelo matemático, principalmente ao efeito na resistência interna da membrana polimérica associado à variação da temperatura e da umidade, bem como, a velocidade na qual as reações químicas causadas pelas mudanças das pressões parciais dos gases ocorrem.

Tabela 2.5: Modelo H-1000 FCS-C1000.

Parâmetro	Valor
Resistência do eletrólito	0,2 (Ωcm^2) para 55(°C)
Dimensão célula unitária	260 x 46 (mm^2)
Espessura célula unitária	0,04 (mm)
Limite densidade de corrente	3 (A/cm^2) (unitária)
Densidade de corrente de troca	0,4 (A/cm^2) (unitária)

Do mesmo modo, a Figura 2.6 (b) exibe o resultado experimental para a curva de potência da CaC versus o resultado do modelo teórico. A divergência neste resultado aparece de forma reduzida na região ligada as perdas por transporte de massa, porém um erro menor do que 1% pode ser considerado satisfatório para os propósitos deste trabalho.

Figura 2.6: Curva de polarização (v versus i) (a) e Curva de potência (P versus i) (b).

A variação na temperatura de operação da CaC para o modelo desenvolvido é analisada na Figura 2.7. Ao contrário do que sugere a equação de Nernst, o aumento na temperatura de operação da CaC aumenta a tensão da célula conforme discutido em [9]. O aumento de tensão está associado ao maior impacto da temperatura na corrente de troca, o que reduz, significativamente, as perdas [9]. Entretanto, conforme [18], em temperaturas de

operação da célula maiores do que 100°C, as membranas poliméricas (como o Nafion®) apresentam uma queda de desempenho.

Os resultados teóricos indicam um aumento de 1,5% na tensão de operação da CaC para um aumento hipotético de 10°C em relação a temperatura máxima. Apesar de representar um aumento na tensão, em termos práticos, o controle da temperatura pode representar um esforço questionável, já que a temperatura pode variar por toda a extensão da CaC de forma não uniforme desde sua entrada até a saída. Além disso, o aumento em excesso da temperatura pode provocar ressecamento e rompimento da membrana polimérica, além de uma possível permeação de gases através da membrana [18].

Por outro lado, se o controle de temperatura na operação de uma CaC é questionável, técnicas para elevarem a sua temperatura na inicialização podem representar um aumento significativo na sua tensão de saída. O capítulo 7 deste trabalho abordará este assunto com mais detalhes.

Figura 2.7: Variação de temperatura. (a) Curva de polarização (v versus i) e (b) Curva de potência (P versus i).

2.7 Inicialização da CaC

A construção e validação do modelo discutido na seção anterior têm como referência os resultados experimentais fornecidos pelo fabricante. Entretanto, as condições destes resultados ocorrem em um ambiente com temperatura e pressão atmosférica controlada e são extraídos após doze horas ininterruptas de funcionamento com potência nominal conforme anexo A. Este período de preparação para a sua operação é conhecido como *warming-up* [19]

e é necessário para que a CaC atinja a sua temperatura de operação e, principalmente para este tipo de CaC, a hidratação correta da sua membrana polimérica.

Da mesma forma, as variáveis de operação da CaC como, por exemplo, pressão de entrada, pureza do hidrogênio e fluxo de ar também impactam no seu desempenho, porém são controladas e não necessitam de *warming-up*. Ao mesmo tempo, existem aquelas que não possuem controle e necessitam de *warming-up* para a sua estabilização como, por exemplo, temperatura e hidratação da membrana.

O período de *warming-up* depende da condição em que a CaC se encontra e pode ter duração de até doze horas. Especificamente para esta CaC, caso o seu uso seja interrompido por mais de quatro semanas, um período de doze horas de *warming-up* e um processo de injeção de água deionizada na entrada de hidrogênio são necessários para a obtenção da curva de polarização da Figura 2.6 (a) como descrito (no anexo B) pelo fabricante. Este procedimento é necessário, pois ao permanecer sem atividade a membrana polimérica resseca e a potência da célula é reduzida em até 50% do seu valor nominal conforme ilustrado no anexo B. Neste contexto, com a membrana ressecada a CaC não consegue gerar a hidratação necessária e pode danificar permanentemente a sua membrana polimérica.

As explanações acima servem de base para introduzir os resultados experimentais obtidos em laboratório e ilustrados na Figura 2.8. Os resultados foram obtidos após a injeção de água deionizada na entrada de hidrogênio e *warming-up* de duas horas, pois em um primeiro teste a CaC apresentou uma redução substancial no valor da potência nominal. O *warming-up* foi fixado em duas horas devido ao elevado consumo de hidrogênio (13 L/min) e reduzida disponibilidade do combustível.

Considerando um *warming-up* de doze horas, o consumo de hidrogênio seria de aproximadamente 9000 litros, o que corresponde 1,3 tubos de 7 m³ de hidrogênio. Naturalmente esses valores são apresentados tão somente com o objetivo de esclarecer a decisão de um *warming-up* de duas horas e as dificuldades enfrentadas em laboratório.

Finalmente, a Figura 2.8 ilustra os resultados experimentais da curva de polarização da CaC extraídas com a carga eletrônica da Chroma série 6310A em três momentos sequenciais. Observa-se nos resultados que as perdas na região de ativação são mais acentuadas que aquelas apresentadas pelo fabricante. Além disso, as perdas na região ôhmica são maiores e constantes ao longo da curva, sendo que as perdas por concentração não foram observadas.

Figura 2.8: Curva de polarização (v versus i) (a) e Curva de potência (P versus i) (b).

A queda na região ôhmica é explicada através da hidratação da membrana polimérica, uma vez que a condutividade da membrana é proporcional a sua hidratação. Trabalhos associados à eletroquímica abordam esta relação como sendo uma variável de controle para projetos de membranas, sendo possível controlá-la através da umidade dos próprios gases de entrada. Em trabalhos como [20, 21] são apresentados resultados que estabelecem a relação de condutividade e, portanto, da resistência ôhmica, com a hidratação da membrana.

Por fim, o ponto de máxima potência da CaC (1 kW) foi alcançado não mais em 35 A, mas sim com 38 A e uma tensão de 26,41 V. Com 35 A a CaC apresentou uma tensão de 26,41 V para o terceiro teste, possuindo uma redução de 8,3% em relação ao do fabricante. Salienta-se que em [11] utilizou-se uma CaC do mesmo fabricante, porém com potência de 2 kW e as diferenças nos resultados quando comparados com os do fabricante são semelhantes aos apresentados nesta seção.

2.8 Dinâmica da CAC

Para tratar da dinâmica da CaC é recomendável a apresentação do fenômeno denominado *charge double layer*, ou efeito de dupla camada de carga. A descrição deste fenômeno está associada com a vinculação da dinâmica da CaC com as perdas por ativação e concentração, que por sua vez estão ligadas ao fenômeno de dupla camada de carga.

O efeito de dupla camada de carga surge à medida que dois materiais de diferentes composições estão próximos um do outro, produzindo um acúmulo de cargas nas superfícies,

ou uma transferência de carga de um material para o outro [15, 16]. Na CaC, este fenômeno ocorre na região de interconexão entre o eletrodo (cátodo ou ânodo) e o eletrólito (membrana) e possui comportamento dinâmico similar ao de um capacitor, influenciando nas quedas de tensões resultantes das perdas por ativação e concentração [9, 16].

Ainda que o foco deste trabalho não seja a representação da CaC através do seu circuito elétrico equivalente, é oportuno a sua representação neste momento, considerando que através do circuito equivalente é possível exemplificar o efeito de dupla camada de carga. No circuito da Figura 2.9, as perdas ôhmicas são representadas por R_{ohmico} , as perdas de ativação por R_{at} e as perdas por concentração por R_c . Já o efeito capacitivo associado ao fenômeno de dupla camada de carga é representado pela capacitância C .

Figura 2.9: Circuito elétrico equivalente.

Desta forma, uma alteração na corrente da CaC implicará em uma dinâmica na sua tensão, sendo uma parcela com variação instantânea devido a queda ôhmica e outra com dinâmica lenta associada as quedas de tensões resultantes das perdas por ativação e concentração, as quais estão representadas pelo capacitor da Figura 2.9. Neste modo, a constante de tempo do circuito RC é correlacionado à parcela com dinâmica lenta da CaC e pode ser representado por (2.36).

$$\tau = R_t C \quad (2.36)$$

Onde:

R_t : resistência total da associação em série de R_{at} com R_c (Ω);

τ : constante de tempo do circuito relacionado com a dinâmica da CaC (s).

Com base no exposto, torna-se possível a extração dos parâmetros para representar a dinâmica da CaC. De forma geral, dois métodos são encontrados com frequência na literatura, sendo um deles o método de espectroscopia de impedância eletroquímica descrito em [16, 18], e o outro o de interrupção de corrente [15, 16].

O método de espectroscopia de impedância eletroquímica é uma técnica utilizada na análise de processos eletroquímicos que ocorrem na interface eletrodo e eletrólito, sendo que o método identifica os parâmetros do processo com base na resposta em frequência [16, 18].

Por outro lado, o método de interrupção de corrente consiste na retirada de carga em degrau e na respectiva medição da corrente e tensão no instante do transitório. Por ser de fácil utilização, o método de interrupção de corrente é utilizado neste trabalho. A Figura 2.10 ilustra o método com as suas variáveis associadas.

Figura 2.10: Representação da curva teórica para obtenção da dinâmica da CaC através do método de interrupção de corrente.

Através da Figura 2.10, pode-se representar a resistência da região ôhmica ($R_{\text{ôhmico}}$) (2.37) e da associação das perdas por concentração e ativação (R_t) (2.38).

$$R_{\text{ôhmico}} = \frac{v_r}{i'_0} \quad (2.37)$$

$$R_t = \frac{v_a}{i'_0} \quad (2.38)$$

Uma vez que o tempo de acomodação da tensão da CaC pode ser estimada pela equação (2.39), a capacitância associada ao modelo assume a forma mostrada por (2.40).

$$T_d = 5\tau \quad (2.39)$$

$$C = \frac{T_d}{5R_t} \quad (2.40)$$

Assim, foram realizados três testes de interrupção de corrente em diferentes regiões de operação. O primeiro teste com transitório de 35 A para 20 A está representado na Figura 2.11, já o segundo com transitório de 20 A para 10 A está ilustrado na Figura 2.12 e, por fim, o terceiro transitório de 10 A para 0 A é exibido na Figura 2.13. Salienta-se que a corrente foi multiplicada por oito vezes devido ao fato das saídas da carga Chrome 6310A possuírem ganho igual a 1/8.

Figura 2.11: Escala vertical: transitório de corrente na CaC de 35 A para 20 A. Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (2,5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 25 ms/div (b).

Figura 2.12: Escala vertical: transitório de corrente na CaC de 20 A para 10 A. Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 100 ms/div (b).

Figura 2.13: Escala vertical: transitório de corrente na CaC de 10 A para 0 A. Pink: corrente CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão (5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 250 ms/div (b).

A Tabela 2.6 sumariza os parâmetros extraídos da CaC para os transitórios apresentados anteriormente. Através desses resultados, observa-se que não há uma correlação entre os mesmos nas três regiões de operação da CaC. Contudo, como existe uma reduzida região de perdas por concentração, observada no resultado da curva de polarização mostrada na Figura 2.8, uma maior correlação é observada quando comparamos os dados teóricos aos transitórios colhidos experimentalmente de 35 A para 20 A e de 20 A para o de 10 A.

Por esta razão, nota-se que cada região da CaC possui uma dinâmica característica e, portanto, pode ser concluído que a dinâmica representada através deste modelo está limitada a um ponto de operação da CaC. A Figura 2.14 ilustra o que seria um circuito equivalente por regiões de operação da CaC.

Tabela 2.6: Parâmetros extraídos da CaC (retirada de corrente).

Parâmetro	Região de operação		
	35 A – 20 A	20 A – 10 A	10 A – 0
T_d	0,075 (s)	0,1 (s)	1,25 (s)
$R_{\delta hmico}$	0,0333 (Ω)	0,05 (Ω)	0,05 (Ω)
R_t	0,333 (Ω)	0,38 (Ω)	0,85 (Ω)
C	0,45 (F)	0,40 (F)	1,666 (F)

Figura 2.14: Circuito elétrico equivalente por regiões de operação.

Não obstante, foram realizadas testes de incremento de corrente nas três regiões de operação da CaC (degrau de corrente). O primeiro teste com transitório de 0 para 10 A está representado na Figura 2.15, já o segundo com transitório de 10 A para 20 A está ilustrado na Figura 2.16 e, por fim, o terceiro transitório de 20 A para 35 A é exibido na Figura 2.17.

Figura 2.15: Escala vertical: transitório de corrente de 0 A para 10 A. Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Escala horizontal: 100 ms/div.

a

b

Figura 2.16: Escala vertical: transitório de corrente de 10 A para 20 A. Pink: corrente da CaC(x8) (250 mA/div). Azul: tensão da CaC (2,5 V/div). Escala horizontal: 10 ms/div.

a

b

Figura 2.17: Escala vertical: transitório de corrente de 20 A para 35 A. Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Escala horizontal: 10 ms/div.

Por meio dos resultados, pode-se observar que a dinâmica da resposta para a entrada e retirada de corrente da CaC são diferentes, ainda que o tempo de resposta e os valores das resistências tenham mantido uma certa correlação entre eles. Além disso, os valores das capacitâncias para os últimos resultados não apresentam grande variação como ilustra a Tabela 2.7.

Ainda que neste trabalho a CaC funcione em diferentes pontos de operação, predominantemente a sua utilização se dará na região ôhmica e, portanto, os resultados escolhidos para o acréscimo da dinâmica no modelo desenvolvido são aqueles da Tabela 2.6 com transitório de 20 A para 10 A. Assim, a constante de tempo é dada pela equação (2.41).

O valor de 20 ms para a dinâmica da CaC é um valor aproximado, pois é preciso levar em conta que na técnica empregada os parâmetros são retirados de forma visual. Além disso, as condições de operação da CaC podem não ser as mesmas em ponto distintos de operação, o que pode levar a alguma divergência. Portanto, este valor será utilizado apenas como referência na análise em simulação que será apresentada durante este trabalho.

Tabela 2.7: Parâmetros extraídos da CaC (degrau de corrente).

Parâmetro	Região de operação		
	0 – 10 A	10 A – 20 A	20 A – 35 A
T_d	0,20 (s)	0,08 (s)	0,07 (s)
$R_{\text{ôhmico}}$	0,15 (Ω)	0,05 (Ω)	0,013 (Ω)
R_t	1,10 (Ω)	0,40 (Ω)	0,320 (Ω)
C	0,26 (F)	0,32 (F)	1,050 (F)

$$\tau = \frac{T_d}{5} = 20 \text{ ms} \quad (2.41)$$

Finalmente, a Figura 2.18 ilustra o diagrama do modelo analítico desenvolvido, o qual engloba as irreversibilidades da CaC com a constante de tempo apresentada nesta seção. No modelo da Figura 2.18, a corrente da CaC é realimentada e através da definição da temperatura de operação e da pressão de entrada do combustível, as pressões parciais da célula são calculadas.

Figura 2.18: Diagrama do modelo da CaC desenvolvido.

De forma a finalizar este capítulo, são mostrados os resultados de simulação da CaC em relação aos resultados experimentais. Observa-se que há uma diferença em relação à amplitude de tensão entre ambos os resultados, sendo que tal fato é justificado pelo *warming-up* de apenas duas horas realizado antes de extrair os resultados experimentais. Contudo, a dinâmica de ambos são equivalentes e adequadas para as próximas análises deste trabalho.

Figura 2.19: Escala vertical: transitório de corrente de 20 A para 10 A. Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div) (a) e simulação (b). Escala horizontal: 100 ms/div (a).

2.9 Considerações finais do capítulo 2

Este capítulo introduziu e descreveu o tema central de estudo e análise deste trabalho. Aspectos práticos associados a sua inicialização e construção foram discutidos, de forma a justificar as dificuldades operativas enfrentadas no seu emprego.

O modelo matemático da CaC foi descrito e a sua dinâmica extraída com base no método de interrupção de corrente. Através dos parâmetros obtidos, constatou-se que há diferentes dinâmicas para cada ponto de operação, sendo que os parâmetros da região ôhmica foram escolhidos para a construção do seu modelo analítico.

Capítulo 3

Interface de potência – estágio CC-CC

A escolha da estrutura do estágio CC está diretamente associada à aplicação a que se destina. No caso das CaCs, devido às suas características serem bastante peculiares, a escolha da estrutura CC precisa contemplar aspectos que garantam o seu adequado funcionamento associado à sua dinâmica.

Dentro do contexto deste trabalho, no qual se busca gerenciar e controlar a potência gerada pela CaC, é necessário que a corrente e/ou a potência de entrada da célula sejam reguladas pelo estágio CC. Ainda que de maneira geral, em aplicações de GD que empregam inversores fonte de tensão (em inglês, *voltage source inverter* - *VSI*), o estágio CC é o responsável por impor a tensão do link CC e não a corrente e/ou potência da fonte.

Para aplicações em GD que empregam fontes alternativas como, por exemplo, CaC's com tensão terminal na ordem de 40 V, é imperativo o uso de conversores CC-CC para adequar os níveis de tensão aos valores da rede de distribuição.

Ao mesmo tempo, a topologia escolhida para este projeto precisa operar com ganho de tensão elevado, uma vez que as CaCs do tipo PEM, em geral, possuem como característica predominante baixa tensão de saída. Com uma tensão desejada de 250 V para o link CC associada a uma tensão de saída de 28,8 V (na máxima potência da CaC), o ganho necessário para operar o conversor é próximo de nove, o que demanda uma análise criteriosa para a escolha do mesmo.

Ainda que se utilizem técnicas de modulação sofisticadas como, por exemplo, a modulação vetorial que eleva em 15% o ganho de tensão quando comparada a modulação senoidal [22], o ganho do conversor é reduzido para próximo de sete, o que ainda é elevado.

Além disso, outro fator considerado relevante na definição do projeto do conversor e discutido em inúmeros trabalhos [23, 24], está relacionado à ondulação de corrente através da CaC. Uma elevada ondulação no sinal de corrente drenado da célula a combustível pode causar perdas, aquecimento e redução da vida útil das CaCs conforme [9].

Por fim, é de interesse do autor destacar que o conversor utilizado e descrito nesta seção foi desenvolvido no trabalho [25], sendo parte integrante de um projeto de GD baseado em CaC desenvolvido no laboratório de fontes alternativa de processamento de energia, o qual este projeto de doutorado também faz parte. Portanto, esta seção limita-se a introduzir e discutir o essencial para o entendimento deste projeto, sendo que a análise, eficiência, ganho e dimensionamento do conversor estão detalhados em [25, 26].

Além disso, destaca-se que o estágio CC é composto pelo estágio de armazenamento de energia, o qual é composto pelo próprio armazenador de energia e um conversor bidirecional. Contudo, o estágio de armazenamento é exposto no capítulo 6, pois entende-se que este estágio é melhor compreendido no contexto do gerenciamento da CaC.

3.1 Técnica *interleaved*

A técnica *interleaved* ou de entrelaçamento é utilizada em diferentes áreas da tecnologia e de diversas formas. Em aplicações de eletrônica de potência, a técnica *interleaved* possui forte apelo em aplicações de média e alta potência, na qual a ondulação do sinal de corrente é um requisito importante [27]. Nestas aplicações, o stress causado pelos níveis de tensão e corrente podem ultrapassar os limites operativos suportados pelos semicondutores. Assim, a operação em paralelo através de múltiplas fases pode ser considerada uma alternativa dentro deste contexto.

Conforme ilustrado na Figura 3.1, a técnica *interleaved* é resultado da conexão de conversores em paralelo, sendo que, em geral, o filtro de saída é compartilhado pelas n fases utilizadas. O chaveamento é realizado com um determinado ângulo de defasagem simétrico entre as fases, desse modo, a corrente total que flui pela entrada do conversor CC-CC é igualmente compartilhada pelas n fases utilizadas.

Figura 3.1: Configuração genérica *interleaved*.

Uma consequência da associação em paralelo é a relação direta da frequência de chaveamento ao número de fases da estrutura. Assim, na medida em que se eleva o número de fases, a frequência de chaveamento também é acrescida, o que tem como resultado a redução da ondulação da corrente. De forma geral, as vantagens desta estrutura podem ser sumarizadas da seguinte forma [27, 28].

- ✓ Menor ondulação na corrente de entrada;
- ✓ Transitórios mais rápidos em resposta a variações de carga;
- ✓ Melhoria na eficiência do conversor.

A Figura 3.2 elucida a comparação entre a estrutura de um conversor *boost* convencional e a de um *boost interleaved*. A ilustração demonstra o compartilhamento de corrente entre as duas fases do conversor *interleaved* e o cancelamento da ondulação da corrente como consequência da modulação empregada nesta topologia.

Figura 3.2: Comparação da ondulação e distribuição da corrente entre (a) *boost* convencional e (b) *boost interleaved*.

Não obstante, esta técnica é empregada em conversores com elevada corrente de entrada, pois a corrente é compartilhada pelas fases, sendo possível utilizar indutores e chaves com capacidades reduzidas (menor corrente nominal) e de menor custo, porém em maior quantidade. Além disso, o uso da técnica *interleaved* possibilita distribuir os componentes do

conversor adequadamente, de forma que o calor decorrente do chaveamento seja dissipado pelo conversor em uma área maior.

3.2 Conversor *interleaved* com multiplicador de tensão

O estágio CC, composto até o momento apenas pelo conversor *interleaved*, está representado em detalhes na Figura 3.3 juntamente com a GD de maneira simplificada. O estágio CC consiste em um conversor elevador de duas fases, ou seja, 2 semicondutores S_1 e S_2 que operam defasados em 180° . Em série há um multiplicador de tensão, o qual dobra a tensão de saída do conversor quando comparada ao conversor *boost* convencional [25-28].

Figura 3.3: Configuração da geração distribuída com foco na estrutura CC.

A Figura 3.4 ilustra os quatro intervalos de chaveamento em que a operação do conversor pode ser dividida, considerando que o conversor opere com um ciclo de trabalho superior a 0,5. Conforme [25-29] os intervalos de chaveamento são:

- ✓ No instante em que as duas chaves se encontram fechadas (k_1T_S e k_3T_S);
- ✓ No instante em que apenas a chave S_2 está fechada (k_2T_S);
- ✓ E no instante em que apenas a chave S_1 está fechada (k_4T_S).

Figura 3.4: Intervalos de chaveamento do conversor *interleaved*.

Igualmente como desenvolvido em [25-29], este trabalho emprega a modelagem do conversor em espaço de estado e considera que o vetor de estado seja (3.1), o vetor de entrada (3.2) e o vetor de saída (3.3).

$$\mathbf{x} = [i_{L1} \quad i_{L2} \quad v_{C1} \quad v_{C2} \quad v_{link_CC}]^T \quad (3.1)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} v_{CaC} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} i_{L1} + i_{L2} \\ v_{link_CC} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Uma vez que existem quatro subintervalos de chaveamento conforme descrito na Figura 3.4, tem-se, portanto, quatro matrizes de estado ($\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3$ e $\mathbf{A}_4$) e quatro matrizes de entradas ($\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3$ e $\mathbf{B}_4$) que possuem as seguintes relações (3.4).

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_3 \\ \mathbf{A}_1 \neq \mathbf{A}_2 \neq \mathbf{A}_4 \\ \mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_3 = \mathbf{B}_4 \end{cases} \quad (3.4)$$

As matrizes de estado e de entrada podem ser encontradas em [25, 26]. Assim, obtidas as matrizes de espaço de estado que representam os circuitos em cada intervalo de chaveamento, a matriz média que representa o conversor pode ser obtida pela combinação das matrizes de cada subintervalo, ponderadas pelo período relativo a cada subintervalo de chaveamento.

Ainda sob a análise da Figura 3.4, pode se visualizar que o período em que uma das chaves permanece aberta é $(1-k)T_S$, sendo k o ciclo de trabalho. Como o chaveamento entre as fases do conversor possui defasagem de 180° , tem-se que $k_1T_S + k_2T_S = \frac{1}{2}T_S$ e $k_3T_S + k_4T_S = \frac{1}{2}T_S$. Além disso, k_2 e k_4 são iguais a $(1-k)$ o que resulta em $k_1 = k_3 = \frac{1}{2} - (1-k) = k - \frac{1}{2}$ [25, 26]. Portanto, a operação matricial que fornece a matriz de estado média do conversor é dada pela equação (3.5).

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \sum_{i=1}^4 \mathbf{A}_i k_i = \mathbf{A}_1 \left(k - \frac{1}{2} \right) + \mathbf{A}_2 (1-k) + \mathbf{A}_3 \left(k - \frac{1}{2} \right) + \mathbf{A}_4 (1-k) \\ \mathbf{A} = (-\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_4) + k(2\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_4) \end{cases} \quad (3.5)$$

Como as matrizes de entrada são iguais para todos os subintervalos, a matriz $\mathbf{B}$ resultante da modelagem média é invariante.

Assim, considerando que o conversor possui um comportamento não linear e que a inserção da perturbação no vetor de entrada se propaga aos vetores de estados e de saída e, que o ciclo de trabalho k se modifica, de ciclo em ciclo, em torno do ponto de linearização, tem-se $k = K + \hat{k}$, sendo K o valor médio em regime permanente e $\hat{k}$ o valor CA em torno do ponto de linearização. Portanto, aplicando pequenos sinais na equação de estados chega-se na equação (3.6).

A aproximação de pequenos sinais consiste em assumir que o valor CA da perturbação inserida na análise seja muito menor do que o valor CC das variáveis, de tal modo que a modelagem realizada seja válida para pequenas excursões de sinais em torno do ponto linearizado [25-30].

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} = \left[(-\mathbf{A}_I + \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_4) + k(2\mathbf{A}_I - \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_4)\right]\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{X}} + \hat{\mathbf{x}} = \left[(-\mathbf{A}_I + \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_4) + (K + \hat{k})(2\mathbf{A}_I - \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_4)\right](\mathbf{X} + \hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{B}(\mathbf{U} + \hat{\mathbf{u}}) \end{cases} \quad (3.6)$$

Em regime permanente os valores das variáveis de estado são constantes e, portanto, a derivada do vetor de estados em regime permanente é nula, assim tem-se (3.7).

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = 0 \\ 0 = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \\ \mathbf{X} = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{U} \end{cases} \quad (3.7)$$

Deste modo, a equação (3.8) é obtida considerando que a variação da componente CC é nula como descrito em (3.7) e que as multiplicações entre as variáveis CA são muito pequenas, ou seja, $\hat{\mathbf{x}}\hat{k} \ll 1$.

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = \left[(-\mathbf{A}_I + \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_4) + (K + \hat{k})(2\mathbf{A}_I - \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_4)\right](\mathbf{X} + \hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{B}(\mathbf{U} + \hat{\mathbf{u}}) \\ \hat{\mathbf{x}} = \left[(-\mathbf{A}_I + \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_4) + K(2\mathbf{A}_I - \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_4)\right]\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}} + (2\mathbf{A}_I - \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_4)\mathbf{X}\hat{k} \\ \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_n\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}} + \mathbf{F}\hat{k} \end{cases} \quad (3.8)$$

Neste momento, o valor CA do ciclo de trabalho $\hat{k}$ é uma nova entrada, sendo $\mathbf{F}$ o resultado da operação matricial $(2\mathbf{A}_I - \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_4)\mathbf{X}$, a qual pode ser incorporada a matriz de entradas. De tal modo, obtém-se uma nova matriz de entradas $\mathbf{B}'$ conforme (3.9).

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_n\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}} + \mathbf{F}\hat{k} = \mathbf{A}_n\hat{\mathbf{x}} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{u}} \\ \hat{k} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_n\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}'\hat{\mathbf{u}}' \quad (3.9)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação e rearranjando os termos da equação (3.9), tem-se (3.10)

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_n \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}' \hat{\mathbf{u}}' \\ s\hat{\mathbf{x}}(s) = \mathbf{A}_n \hat{\mathbf{x}}(s) + \mathbf{B}' \hat{\mathbf{u}}' \\ \hat{\mathbf{x}}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{B}' \hat{\mathbf{u}}' \end{cases} \quad (3.10)$$

Como é de interesse a obtenção apenas das funções de transferências que possuem a entrada como sendo a variação do ciclo de trabalho em torno do ponto linearizado, chega-se na equação (3.11).

$$\hat{\mathbf{x}}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{F} \hat{k} \quad (3.11)$$

As saídas em tensão (3.12) e em corrente (3.13) são obtidas através da combinação linear das variáveis do vetor de estado pelo uso da matriz de saída $\mathbf{C}_v$ e $\mathbf{C}_i$, assumindo a matriz $\mathbf{D} = 0$.

$$\begin{cases} \hat{v}_{link_CC} = \mathbf{C}_v \hat{\mathbf{x}}(s) \\ \mathbf{C}_v = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} \hat{i}_{L1} + \hat{i}_{L2} = \hat{i}_L = \mathbf{C}_i \hat{\mathbf{x}}(s) \\ \mathbf{C}_i = [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \end{cases} \quad (3.13)$$

Por fim, são obtidas as funções de transferência da tensão do link CC (3.14) e da corrente de entrada da CaC (3.15) em relação ao ciclo de trabalho em torno do ponto de linearização.

$$G_{vlink_CC}(s) = \frac{\hat{v}_{link_CC}}{\hat{k}} = \mathbf{C}_v (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{F} \quad (3.14)$$

$$G_{iCaC}(s) = \frac{\hat{i}_{L1} + \hat{i}_{L2}}{\hat{k}} = \mathbf{C}_i (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{F} \quad (3.15)$$

3.3 Controladores para o conversor *interleaved*

Diversos métodos para o projeto dos controladores podem ser encontrados na literatura. Em particular, o método apresentado em [22, 31], que define os valores das constantes dos controladores a partir da definição da margem de fase e da frequência de corte desejadas [32, 33], é usado para o controle de corrente e/ou tensão da GD similar ao proposto nesse trabalho.

Contudo, neste trabalho opta-se pelo uso do software MatLab[®], que a partir da definição da planta disponibiliza as constantes do controlador com precisão exigida neste trabalho. Sendo assim, de posse das funções de transferência da tensão do link CC (3.14) e da corrente da CaC (3.15), a obtenção das constantes dos controladores ocorre por meio das malhas de controle da tensão do link CC e da corrente da CaC, as quais são exibidas nas Figura 3.5 (a) e (b), respectivamente.

Figura 3.5: Malha de controle (a) corrente da CaC e (b) tensão do link CC.

Onde as variáveis apresentadas na Figura 3.5 são:

$PI_{i_{CaC}}$: constantes proporcional e integral do controlador de corrente da CaC;

k : ciclo de trabalho;

$G_{i_{CaC}}$: função de transferência da corrente da CaC;

H_c : ganho do sensor de corrente;

$PI_{v_{CaC}}$: constantes proporcional e integral do controlador da tensão do link CC;

G_{vlink_CC} : função de transferência da corrente da tensão do link CC

H_v : ganho do sensor de tensão do link CC.

A Tabela 3.1 exibe os parâmetros utilizados para a obtenção das constantes do controlador PI (Proporcional-Integral), considerando que (mf) é a margem de fase, (fcl) a frequência de corte desejada e (fs) a frequência de chaveamento do conversor.

Tabela 3.1: Parâmetros de projeto do controlador da CaC.

Parâmetro	Valor
fs	12 k (Hz)
mf	60 (°)
fcl (corrente)	2,0 k (Hz)
fcl (tensão)	0,2 k (Hz)
H_c	0,025
H_v	0,002

A resposta em frequência para a malha de corrente e de tensão do link CC estão ilustradas na Figura 3.6 (a) e (b), respectivamente. Na Figura 3.6 (a) identifica-se a ampla banda passante apresentada pela estrutura de controle de corrente para uma frequência de corte de 2 kHz e margem de fase de 60°. Já a resposta em frequência para o controle da tensão do link CC é projetada para uma margem de fase de 60° e frequência de corte de 200 Hz.

Figura 3.6: Resposta em frequência em malha aberta para (a) corrente da CaC e (b) tensão do link CC.

3.4 Resultados experimentais

A CaC e o conversor *interleaved* da Figura 3.7 são simulados e testados experimentalmente. Nestes resultados, o estágio CC controla a tensão do link CC com a malha de controle apresentada na Figura 3.5 (b), ou seja, o ponto de operação da CaC é dependente da carga conectada ao link CC. A Tabela 3.2 ilustra os parâmetros utilizados para a obtenção dos resultados experimentais.

Com o controle da tensão do link CC em cascata com a malha de corrente, não é possível controlar o ponto de operação da CaC. Uma alternativa é o controle da malha apresentada na Figura 3.5 (a), porém há a necessidade do controle da tensão do link CC por outro estágio, o que é possível quando o estágio CA estiver presente. Tais resultados e discussões estão presentes no decorrer do texto e são apresentados no capítulo 5.

Figura 3.7: CaC e conversor *interleaved* testados experimentalmente.

Conforme pode ser observado pela Figura 3.8, a CaC é inicializada em rampa com carga de 270 W e após um determinado instante é realizado um degrau de 600 W (870 W no total). Neste mesmo resultado, a corrente total da CaC alcançou 32 A para uma tensão inicial de 21 V que se estabilizou em 25 V.

Tabela 3.2: Parâmetros utilizados em simulação e experimental.

Estágio	Parâmetro	Valor
CaC	Número de células	48
	Potência máxima	1000 (W)
	Desempenho	28,8 (V) @ 35(A)
	Máx. Temperatura de operação	65 (°)
	Pressão entrada hidrogênio	0,45-0,55 (bar)
	Consumo de hidrogênio	13 (L/min)
Conversor <i>interleaved</i>	Tensão link CC	250 (V)
	Capacitância link CC	1360 μ (F)
	L_1, L_2	870 μ (H)
	R_{l1}, R_{l2}	34,8 m (Ω)
	C_1, C_2	1 μ (F)
	R_{c1}, R_{c2}	29 m (Ω)
	R_{S1}, R_{S2}	24 m (Ω)
	f_s	12 k (Hz)

Limitou-se em 870 W o valor máximo de carga, pois neste valor de potência a tensão da CaC atingiu 21 V. Salienta-se que originalmente, na máxima potência de operação a tensão da CaC é de 28,8 V, porém devido a sua inicialização e *warming-up* já descritos anteriormente tais valores não foram atingidos.

Figura 3.8: Escala vertical: inicialização da CaC e degrau no link CC (a) e detalhe da tensão e corrente da CaC (b). Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor (10 A/div). Pink: corrente da fase “b” do conversor (10 A/div). Marrom: soma das correntes dos braços do conversor (10 A/div). Roxo: potência da CaC (200 W/div). Escala horizontal: 10 s/div.

Já a Figura 3.9 (a) ilustra a corrente de saída da CaC que flui nos dois braços do conversor. Na corrente observam-se certas oscilações, as quais serão objetos de análise no curso deste trabalho. Ao mesmo tempo, na Figura 3.9 (b) é possível verificar a ondulação de corrente de 3 A em cada fase do conversor. Contudo, a ondulação real presente na CaC é metade deste valor (1,5 A) ou 4,68%, uma vez que a corrente na fonte é a soma de ambas as correntes do conversor.

Na Figura 3.9 (b) é possível observar uma diferença de amplitude entre as correntes de cada fase do conversor. Esta diferença pode ser explicada pela diferença de impedância entre as fases, uma vez que os indutores, por exemplo, foram obtidos com a associação em paralelo de indutores comerciais que já apresentavam uma diferença de valor na indutância.

Figura 3.9: Escala vertical: degraus de corrente da CaC (a) e ondulação da corrente da CaC (b). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor (2,5 A/div). Pink: corrente da fase “b” do conversor (2,5 A/div). Escala horizontal: 50 ms/div (a) e 50 μs/div (b).

Ao mesmo tempo, o impacto das manobras de carga na tensão do link CC e na tensão da CaC são demonstrados na Figura 3.10. Na Figura 3.10 (a) o afundamento de tensão do link CC é de aproximadamente 12% (30 V) com uma dinâmica de recuperação lenta (aproximadamente 4 s) associado à CaC. Da mesma forma, na Figura 3.10 (b) há uma elevação de 12% (30 V) quando da retirada de carga, porém com o tempo de acomodação mais rápido (aproximadamente 50 ms) quando comparado a entrada de carga.

Por meio do resultado da Figura 3.10 (b), fica evidente que o tempo de recuperação da tensão do link CC é impactado pela dinâmica da CaC. Considerando que se deseja gerenciar a potência gerada pela CaC, esta estrutura de controle não se mostra a mais adequada. Além de não ser desejado os transitórios observados tanto na tensão quanto na corrente da célula.

Contudo, tal estrutura é apresentada neste momento para que se possa ter como referência quando forem apresentadas outras estruturas para o gerenciamento da GD e CaC.

Figura 3.10: Escala vertical: entrada (a) e saída (b) de carga. Verde: tensão do link CC (25 V/div). Azul: tensão da CaC (2,5 V/div). Escala horizontal: 500 ms/div (a) e 50 ms/div (b).

3.5 Considerações finais do capítulo 3

Este capítulo expôs parte daquilo que compõe o estágio CC neste trabalho. O conversor para a CaC foi exibido e suas principais características associadas ao funcionamento da célula foram introduzidos. O modelo em espaços de estados e o projeto dos controladores foram discutidos.

Devido à ausência do estágio CA, apenas o controle da tensão do link CC foi discutido, sendo que o controle da corrente da CaC e, por consequência, do seu ponto de operação será trazido nos próximos capítulos deste trabalho.

Devido ao fato da CaC estar susceptível aos transitórios de carga presentes no link CC, foram observados sobressinais nos transitórios realizados de até 12%. Com a inserção do estágio CA, os próximos capítulos trazem alternativas para melhorar os pontos negativos observados neste capítulo.

Capítulo 4

Interface de potência – estágio CC-CA

Os dois capítulos anteriores trataram da fonte principal de energia empregada neste trabalho e do conversor que processa a sua energia. Isoladamente, alguns resultados experimentais foram apresentados, porém de forma limitada sem gerenciar apropriadamente a CaC. Assim, o estágio CC discutido anteriormente, além de controlar a tensão no link CC, forneceu o ganho necessário de tensão para o estágio CA.

Como sequência do trabalho, neste capítulo são apresentadas as estruturas de controle e a configuração do estágio CA empregada na GD. Considerando que neste trabalho a GD baseada em CaC apresenta como objetivo tanto operar conectada quanto ilhada em relação à rede de distribuição, duas estruturas de controle convencionais são expostas. Além disso, o algoritmo de sincronização empregado para a operação conectada é, também, descrito no decorrer deste capítulo.

Na estrutura de controle convencional, a operação no modo conectado à rede possui como função controlar a corrente imposta no ponto de acoplamento comum (PAC). Ao mesmo tempo, no modo ilhado o objetivo é estabilizar a tensão no PAC.

Trata-se neste capítulo como “estrutura de controle convencional” aquela na qual a tensão no link CC é controlada pelo estágio CC, sendo o estágio CA responsável apenas por controlar a potência injetada na rede de distribuição para o modo conectado ou estabilizar a tensão no PAC para o modo ilhado.

Dentro deste contexto, ponderando que o objetivo central deste trabalho é gerenciar o ponto de operação da CaC, a necessidade de impor a tensão do link CC limita ou até mesmo impossibilita o gerenciamento da potência da CaC. Uma vez que o gerenciamento do ponto de operação da CaC está atrelado ao controle da corrente de entrada do estágio CC (saída da célula) e não ao controle da tensão do link CC.

Desta forma, a introdução da estrutura convencional neste capítulo é considerada como referência, pois com ela será possível traçar um paralelo com a discussão que se dará nos próximos capítulos, quando as estratégias propostas para o gerenciamento da potência produzida pela CaC forem apresentadas.

4.1 Configuração da GD empregada

A Figura 4.1 traz a configuração da GD com enfoque principal na estrutura CA. A chave que altera o controle da GD, bem como as posições dos filtros do inversor são mostradas nesta figura. De forma não detalhada, estão representadas a CaC e a estrutura CC que em parte já foram abordadas em capítulos anteriores.

Figura 4.1: Configuração da geração distribuída com foco na estrutura CA.

4.2 Operação no modo ilhado

Neste modo de operação, a rede de distribuição não está presente o que implica na necessidade de se fixar tensão e frequência no PAC. Sendo assim, o objetivo do controle no modo ilhado é controlar a tensão terminal do conversor. Para isso, o controlador é representado em coordenadas $\alpha\beta$, sendo a conversão abc para coordenadas $\alpha\beta$ realizada por meio da transformação linear $T_{\alpha\beta}$ descrita em (4.3).

O diagrama simplificado para a modelagem da GD operando ilhada está representado na Figura 4.2. No diagrama estão representadas as tensões de saída da GD, a resistência e a indutância do filtro indutivo e o filtro capacitivo com a carga local. Para fins de análise, as

tensões e correntes representadas no diagrama da Figura 4.2 são consideradas senoidais e equilibradas.

Geração Distribuída

Figura 4.2: Diagrama simplificado para o modo ilhado.

Aplicando as leis de Kirchhoff das correntes ao diagrama da Figura 4.2, obtêm-se as seguintes equações (4.1).

$$\begin{cases} i_{a_gd} = i_{a_c} + i_{a_carga} \\ i_{b_gd} = i_{b_c} + i_{b_carga} \\ i_{c_gd} = i_{c_c} + i_{c_carga} \end{cases} \quad (4.1)$$

Pode-se considerar que a corrente no capacitor pode ser expressa pela derivada da tensão, a qual em termos matriciais pode ser apresentada conforme (4.2).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{a_c} \\ v_{b_c} \\ v_{c_c} \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} i_{a_gd} \\ i_{b_gd} \\ i_{c_gd} \end{bmatrix} - \frac{1}{C} \begin{bmatrix} i_{a_carga} \\ i_{b_carga} \\ i_{c_carga} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Considerando a transformada de Clark $T_{\alpha\beta}$ definida na equação (4.3).

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Multiplicando (4.2) em ambos os lados pela transformada $T_{\alpha\beta}$, obtêm-se as expressões apresentadas em (4.5).

$$T_{\alpha\beta} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{a_c} \\ v_{b_c} \\ v_{c_c} \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta} \frac{1}{C} \begin{bmatrix} i_{a_gd} \\ i_{b_gd} \\ i_{c_gd} \end{bmatrix} - T_{\alpha\beta} \frac{1}{C} \begin{bmatrix} i_{a_carga} \\ i_{b_carga} \\ i_{c_carga} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{\alpha_c} \\ v_{\beta_c} \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} i_{\alpha_gd} \\ i_{\beta_gd} \end{bmatrix} - \frac{1}{C} \begin{bmatrix} i_{\alpha_carga} \\ i_{\beta_carga} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

A análise para pequenos sinais neste modo de operação pode ser realizada com base na adição das perturbações conforme descrito na expressão (4.6).

$$\begin{cases} v_{\alpha\beta_c} = V_{\alpha\beta_c} + \hat{v}_{\alpha\beta_c} \\ i_{\alpha\beta_gd} = I_{\alpha\beta_gd} + \hat{i}_{\alpha\beta_gd} \\ i_{\alpha\beta_carga} = I_{\alpha\beta_carga} + \hat{i}_{\alpha\beta_carga} \end{cases} \quad (4.6)$$

Considera-se que $V_{\alpha\beta_c}$, $I_{\alpha\beta_gd}$ e $I_{\alpha\beta_carga}$ são as representações das respectivas variáveis em regime permanente, e que $\hat{v}_{\alpha\beta_c}$, $\hat{i}_{\alpha\beta_gd}$ e $\hat{i}_{\alpha\beta_carga}$ representam variações em torno do ponto de operação. Contudo, no estágio CA as variáveis de regime permanente perdem o seu significado, uma vez que as tensões e correntes variam continuamente no tempo e, portanto, não há um ponto de operação definido conforme descrito por [34]. Sendo assim, substituindo (4.6) em (4.5) chega-se em (4.7).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{v}_{\alpha-c} \\ \hat{v}_{\beta-c} \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} \hat{i}_{\alpha-gd} \\ \hat{i}_{\beta-gd} \end{bmatrix} - \frac{1}{C} \begin{bmatrix} \hat{i}_{\alpha-carga} \\ \hat{i}_{\beta-carga} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Considerando a corrente de carga como um distúrbio e aplicando a transformada de Laplace em (4.7), é possível obter diretamente a função de transferência que relaciona a tensão sobre o capacitor e a corrente de saída da GD (4.8).

Sendo $\hat{v}_{\alpha\beta-c}$ a representação da tensão no eixo alfa e beta no filtro capacitivo que se deseja controlar em coordenadas estacionárias.

$$Gv(s) = \frac{\hat{v}_{\alpha-c}(s)}{\hat{i}_{\alpha-gd}(s)} = \frac{\hat{v}_{\beta-c}(s)}{\hat{i}_{\beta-gd}(s)} = \frac{1}{sC} \quad (4.8)$$

Por outro lado, a função de transferência da malha interna de corrente é alcançada aplicando as leis de Kirchhoff das tensões ao diagrama da Figura 4.2, realizando esta operação tem-se (4.9).

$$\begin{cases} v_{a-gd} = R_{gd}i_{a-gd} + L_{gd} \frac{d}{dt}(i_{a-gd}) + v_{a-c} \\ v_{b-gd} = R_{gd}i_{b-gd} + L_{gd} \frac{d}{dt}(i_{b-gd}) + v_{b-c} \\ v_{c-gd} = R_{gd}i_{c-gd} + L_{gd} \frac{d}{dt}(i_{c-gd}) + v_{c-c} \end{cases} \quad (4.9)$$

Multiplicando ambos os lados pela transformada $T_{\alpha\beta}$ (4.3), obtém-se em (4.10) a relação expressa em coordenadas $\alpha\beta$.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\alpha-gd} \\ i_{\beta-gd} \end{bmatrix} = -\frac{R_{gd}}{L_{gd}} \begin{bmatrix} i_{\alpha-gd} \\ i_{\beta-gd} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{gd}} \begin{bmatrix} v_{\alpha-gd} \\ v_{\beta-gd} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_{gd}} \begin{bmatrix} v_{\alpha-c} \\ v_{\beta-c} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Considerando que (4.11):

$$\begin{cases} u_\alpha = v_{\alpha_gd} - v_{\alpha_c} \\ u_\beta = v_{\beta_gd} - v_{\beta_c} \end{cases} \quad (4.11)$$

Substituindo (4.11) em (4.10) e aplicando a transformada de Laplace chega-se em (4.12), a qual já é está com sua representação para pequenos sinais.

$$\begin{cases} s\hat{i}_{\alpha_gd} = -\frac{R_{gd}}{L_{gd}}\hat{i}_{\alpha_gd} + \frac{1}{L_{gd}}\hat{u}_\alpha \\ s\hat{i}_{\beta_gd} = -\frac{R_{gd}}{L_{gd}}\hat{i}_{\beta_gd} + \frac{1}{L_{gd}}\hat{u}_\beta \end{cases} \quad (4.12)$$

Por fim, a função de transferência que correlaciona a diferença de tensão entre a GD e a tensão sobre o capacitor em relação a corrente da GD é expressa por (4.13).

$$Gi(s) = \frac{\hat{i}_{\alpha_gd}(s)}{\hat{u}_\alpha(s)} = \frac{\hat{i}_{\beta_gd}(s)}{\hat{u}_\beta(s)} = \frac{1}{R_{gd} + sL_{gd}} \quad (4.13)$$

4.3 Controladores para o modo ilhado

De posse das funções de transferência da tensão (4.8) e da corrente do estágio CA (4.13), a obtenção das constantes dos controladores ocorre por meio da malha de controle exibida na Figura 4.3. Semelhante ao realizado no estágio CC, utiliza-se o software MatLab[®] para a definição das constantes do controlador.

A dinâmica da malha de corrente para o modo ilhado é idêntica à encontrada para o modo conectado, uma vez que as funções de transferência obtidas possuem a mesma forma como será visto na próxima seção. Desta maneira, o resultado para a malha de corrente é apresentado na próxima seção. Sendo que neste momento é exibido o resultado para a malha completa da tensão em cascata com a malha de corrente.

Figura 4.3: Malha de controle em tensão CA para o modo ilhado.

As variáveis apresentadas na Figura 4.3 são:

- k_{p_i} e k_{i_i} : constantes proporcional e integral do controlador de corrente, respectivamente;
- G_{vsi} : ganho do VSI;
- H_c : ganho do sensor de corrente;
- R_{gd} e L_{gd} : resistência (Ω) e indutância (H) do filtro de saída, respectivamente;
- k_{p_v} e k_{i_v} : constantes proporcional e integral do controlador de tensão CA, respectivamente;
- H_v : ganho do sensor de tensão CA;
- C : capacitância do filtro capacitivo (F).

A resposta em frequência para a malha completa da tensão em cascata com a corrente está ilustrada na Figura 4.4. Sendo os parâmetros utilizados para a obtenção da resposta apresentados na Tabela 4.1. Na tabela, (mf) é a margem de fase, (fcl) a frequência de corte desejada e (fs) a frequência de chaveamento do conversor.

Tabela 4.1: Parâmetros de projeto do controlador de tensão do estágio CA.

Parâmetro	Valor
fs	12 k (Hz)
mf	70 ($^\circ$)
fcl	0,1 k (Hz)
H_v	0,00556

Figura 4.4: Resposta em frequência do controle em tensão CA para (a) malha aberta e (b) malha fechada.

A análise da resposta em frequência para a tensão no modo ilhado exibe uma reduzida banda passante, sendo que para 60 Hz há uma atenuação de 20 dB como ilustra a Figura 4.4 (b) para a resposta em frequência em malha fechada. A fim de solucionar esta deficiência, o controlador ressonante (R) é posicionado em paralelo com o controlador proporcional (P) de tensão convencional para reduzir a impedância do conversor e compensar/compor a componente fundamental da tensão [35, 36]. A estrutura utilizada para o controlador ressonante é ilustrada na Figura 4.5.

A ideia básica do controlador ressonante é introduzir um ganho infinito na frequência de ressonância desejada, de forma a eliminar o erro de regime permanente [36]. A forma geral do controlador ressonante é encontrada em (4.14), na qual (ω_0) é a frequência angular de ressonância e (k_{i_v}) é o ganho do controlador ressonante [22, 35-37].

$$G(s) = k_{i_v} \frac{2s}{s^2 + (\omega_0)^2} \quad (4.14)$$

Figura 4.5: Controle ressonante.

O diagrama de magnitude e de fase resultante da compensação da fundamental (60 Hz) está mostrado na Figura 4.6, sendo os parâmetros utilizados para o projeto do controlador P+R os mesmos apresentados na Tabela 4.1.

Na resposta em frequência da GD para o modo ilhado, é possível observar a ressonância em 60 Hz (curva preta), tornando possível para esta aplicação a composição do sinal fundamental como desejado.

O efeito do controlador ressonante faz com que ocorra uma redução na impedância da GD na frequência selecionada (de ressonância). Com isso, a GD atinge erro zero de tensão na frequência desejada (60 Hz) [35, 36].

Figura 4.6: Resposta em frequência do controle em tensão CA com controlador ressonante em 60 Hz para (a) malha aberta e (b) malha fechada.

4.4 Operação no modo conectado

Neste modo de operação, a rede de distribuição está presente o que torna necessária a imposição de corrente ou potência por parte da GD, uma vez que a tensão e frequência no PAC são impostas pela própria rede de distribuição. Sendo assim, o objetivo do controle no modo conectado é controlar a corrente de saída do VSI. Neste modo de operação, os controladores são projetados em coordenadas síncronas.

Semelhante ao mostrado para o modo ilhado, considera-se para este cenário que a tensão no link CC é estável e regulada pelo estágio CC. Assim, o diagrama simplificado para a modelagem da GD conectado à rede de distribuição pode ser representado pela Figura 4.7. No diagrama estão representadas as tensões de saída da GD, a resistência e a indutância do

filtro juntamente com a tensão imposta pela rede de distribuição no PAC. Para fins de análise, as tensões e correntes representadas na Figura 4.7 são consideradas senoidais e equilibradas.

Figura 4.7: Diagrama simplificado para o modo conectado.

Aplicando as leis de Kirchhoff das tensões ao diagrama da Figura 4.7, obtêm-se as seguintes equações em (4.15).

$$\begin{cases} -v_{a_gd} + R_{a_gd}i_{a_gd} + L_{a_gd} \frac{d}{dt}(i_{a_gd}) + v_a = 0 \\ -v_{b_gd} + R_{b_gd}i_{b_gd} + L_{b_gd} \frac{d}{dt}(i_{b_gd}) + v_b = 0 \\ -v_{c_gd} + R_{c_gd}i_{c_gd} + L_{c_gd} \frac{d}{dt}(i_{c_gd}) + v_c = 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

A transformação de coordenadas abc para dq é realizada por meio da transformada de Park definida em (4.16), sendo a mesma invariante em potência, porém variante no tempo.

$$T_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\cos(\theta) & -\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Multiplicando (4.15) em ambos os lados pela transformada de Park (4.16), obtêm-se a seguinte relação (4.17):

$$T_{dq} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a_gd} \\ i_{b_gd} \\ i_{c_gd} \end{bmatrix} = -T_{dq} \frac{R_{gd}}{L_{gd}} \begin{bmatrix} i_{a_gd} \\ i_{b_gd} \\ i_{c_gd} \end{bmatrix} - T_{dq} \frac{1}{L_{gd}} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} + T_{dq} \frac{1}{L_{gd}} \begin{bmatrix} v_{a_gd} \\ v_{b_gd} \\ v_{c_gd} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Com a resolução do termo derivativo e manipulação de (4.17), obtém-se (4.18).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d_gd} \\ i_{q_gd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_{gd}}{L_{gd}} & -\omega \\ \omega & \frac{R_{gd}}{L_{gd}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d_gd} \\ i_{q_gd} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{gd}} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L_{gd}} \begin{bmatrix} v_{d_gd} \\ v_{q_gd} \end{bmatrix} = 0 \quad (4.18)$$

A partir da análise da equação (4.18), observa-se o acoplamento entre os eixos em quadratura e direto, sendo esta característica um limitante ao controle independente de cada variável. De forma a tornar o controle em cada eixo independente, o desacoplamento entre os eixos d e q é realizado através da desconsideração dos termos de acoplamentos como ilustrado em (4.19) [38].

$$\begin{cases} \text{eixo}_d = -\underbrace{\omega L_{gd} i_{q_gd}}_{\text{acoplamento}} \\ \text{eixo}_q = +\underbrace{\omega L_{gd} i_{d_gd}}_{\text{acoplamento}} \end{cases} \quad (4.19)$$

Como descrito em [22, 34], assim como a transformada $(T_{\alpha\beta})$, a transformada de Park (T_{dq}) é variante no tempo, porém diferentemente de $(T_{\alpha\beta})$ o impacto do emprego da transformada (T_{dq}) recai sobre a dinâmica da planta em análise [22, 34]. Assim, aplicando pequenos sinais obtém-se a equação (4.20), sendo o eixo direto responsável pela potência ativa e o eixo em quadratura responsável pela potência não ativa da GD.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{d_gd} \\ \hat{i}_{q_gd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{gd}}{L_{gd}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_{gd}}{L_{gd}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{d_gd} \\ \hat{i}_{q_gd} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{gd}} \begin{bmatrix} \hat{v}_{d_gd} \\ \hat{v}_{q_gd} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Por fim, utilizando a transformada de Laplace em (4.20), encontra-se a função de transferência que correlaciona a corrente da GD com a sua tensão $\hat{v}_{d_gd}$ e $\hat{v}_{q_gd}$, a qual é definida pela expressão (4.21):

$$G(s) = \frac{\hat{i}_{d_gd}}{\hat{v}_{d_gd}} = \frac{\hat{i}_{q_gd}}{\hat{v}_{q_gd}} = \frac{1}{R_{gd} + sL_{gd}} \quad (4.21)$$

4.5 Controladores para o modo conectado

Como demonstrado na equação (4.18), há um acoplamento entre os eixos direto e em quadratura para o modo conectado, o que impede o controle independente das variáveis dos eixos d e q . Para tanto, negligenciou-se o termo de acoplamento de forma a promover um controle independente das variáveis. Assim, o desacoplamento dos eixos é realizado com a adição do produto cruzado após a saída dos compensadores como ilustra a Figura 4.8.

Figura 4.8: Controlador de corrente com desacoplamento dos eixos.

Sendo assim, a malha de controle para a corrente é exibida na Figura 4.9. De forma semelhante ao empregado para o controlador de tensão para o modo ilhado, utiliza-se software MatLab® para a obtenção das constantes do controlador.

Figura 4.9: Malha de controle de corrente da GD para o modo conectado.

A Tabela 4.2 exibe os parâmetros utilizados para a obtenção das constantes do controlador PI e as variáveis apresentadas na Figura 4.9 são:

k_{p_i} e k_{i_i} : constantes proporcional e integral do controlador de corrente, respectivamente;

G_{vsi} : ganho do VSI;

H_c : ganho do sensor de corrente;

R_{gd} e L_{gd} : resistência (Ω) e indutância (H) do filtro de saída, respectivamente.

Tabela 4.2: Parâmetros de projeto do controlador de corrente do estágio CA.

Parâmetro	Valor
fs	12 k (Hz)
mf	70 (°)
fcl	1,0 k (Hz)
H_c	0,1

O projeto é realizado com frequência de corte de 1 kHz e margem de fase de 70°, estando a resposta em frequência de malha aberta da corrente ilustrada na Figura 4.10.

Figura 4.10: Resposta em frequência do controle em corrente em malha aberta.

4.6 Algoritmo de sincronização

Além da estrutura de controle, para operar conectado na rede de distribuição, é necessária a utilização de um algoritmo de sincronização para que seja possível a conexão da GD na rede de distribuição. A sincronização neste projeto é realizada através do algoritmo PLL (em inglês *Phase Locked Loop* - PLL), que sintetiza a partir das variáveis internas do PLL (θ , ω) uma senoide de amplitude unitária (u), cuja condição de ortogonalidade, para este caso, em relação à fundamental da tensão medida (v_{rede}), precisa ser respeitada [39, 40].

Desta forma, o valor médio do produto escalar entre a tensão medida e a senoide gerada precisa convergir para zero. O sinal θ_{pll} , que define o argumento utilizado para sintetizar a senoide unitária $u \perp$, é obtido integrando a variável de saída do controlador PI, ou seja, a frequência de sincronismo (ω_{pll}) dada em rad/s [39, 40]. A descrição acima é representada na Figura 4.11.

Figura 4.11: Algoritmo de sincronização PLL.

Neste modelo, o sinal de tensão (v_{rede}) é medido a partir da rede de distribuição e um sinal ortogonal $u \perp$ é gerado pelo algoritmo PLL quando a sincronização é alcançada. A média do produto escalar (dp) é calculada e comparada a um sinal de referência nulo (condição de ortogonalidade), sendo que a diferença destes dois sinais gera um erro que é introduzido ao controlador PI. A saída do controlador PI somada à frequência fundamental da rede ($\omega_r = 2\pi 60$) resulta na frequência angular de ajuste ω_{pll} , sendo integrada de forma a se obter a função $\theta_{pll} = \omega_{pll}t$ do sinal ortogonal sintetizado.

Assim, a frequência e a fase gerada pelo algoritmo de sincronização são usadas para sintetizar o sinal (4.22), o qual é proporcional (em fase) ao sinal de tensão fundamental da rede de distribuição.

$$u_a = \sin(\theta_{pll} + 90^\circ) = \sin(\phi) \quad (4.22)$$

Controladores do algoritmo PLL

O diagrama de blocos da Figura 4.12 é a representação simplificada do algoritmo de sincronização, sendo o mesmo representado pela forma canônica de segunda ordem como mostrado na equação (4.23) [39, 40].

Figura 4.12: Diagrama de blocos do PLL.

$$H_{cl} = \frac{k_{p_pll}s + k_{i_pll}}{s^2 + k_{p_pll}s + k_{i_pll}} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.23)$$

Desta forma, k_{p_pll} e k_{i_pll} podem ser ajustados de acordo com as equações (4.24) e (4.25), respectivamente.

$$k_{p_pll} = 2\xi\omega_n \quad (4.24)$$

$$k_{i_pll} = \omega_n^2 \quad (4.25)$$

Observa-se que reduzindo a frequência de malha fechada ω_n , o algoritmo PLL torna-se menos sensível a ruídos e distorções harmônicas do sinal de entrada. Contudo, uma redução significativa da frequência de corte de malha fechada significa tornar a resposta transitória do algoritmo lenta. Por outro lado, o aumento da frequência de corte implica em um aumento no sobressinal, o que pode levar a uma resposta dinâmica indesejada. Desta forma, há um compromisso entre se obter uma rápida resposta dinâmica e um reduzido sobressinal.

Assim, é inserido um saturador dinâmico no controlador do algoritmo de sincronização de forma a melhorar a resposta dinâmica sem tornar o mesmo instável [22]. A ideia central do saturador dinâmico é separar os limites da parte integral e proporcional do controlador PI de forma que nas transições abruptas, a parte proporcional do controlador atue na regulação, enquanto a parte integral seja limitada até a convergência. Este fato possibilita que se tenha uma rápida resposta dinâmica com reduzido sobressinal.

A Figura 4.13 ilustra o funcionamento do saturador dinâmico com Y_{max} representando o limite máximo de saída do controlador PI e L_{i_pll} o valor máximo assumido, dinamicamente, pelo controle integral do PLL, sendo seu valor calculado pela equação (4.26).

$$|L_{i_pll}| = Y_{max} - |K_{p_pll}\varepsilon| \quad (4.26)$$

Figura 4.13: Saturador dinâmico.

A atuação do saturador dinâmico utilizada no algoritmo de sincronização é analisada na Figura 4.14. Observa-se que a redução do sobressinal em 77% indica a possibilidade de utilização de uma frequência de corte superior, ao passo que o não emprego da saturação dinâmica limita o aumento da frequência de corte e impede uma resposta dinâmica mais rápida. A Tabela 4.3 apresenta os valores empregados para o projeto do algoritmo PLL.

Tabela 4.3: Parâmetros de projeto do controlador do PLL.

Parâmetro	Valor
ω_n	54,0 (rad/s)
ξ	0,707
Y_{max}	10,0 (rad/s)

Figura 4.14: Resposta ao degrau do PLL com (cinza) e sem (laranja) saturação dinâmica.

4.7 Resultados para a GD baseada em CaC

Como estes resultados estão assentados em uma estrutura de controle conhecida na literatura, servirão de referência para os próximos capítulos deste trabalho. Desta forma, esta seção se concentrará nos resultados experimentais dos estágios CC e CA.

Com a estrutura de controle descrito neste capítulo a GD da Figura 4.15 é testada experimentalmente. O estágio CC controla a tensão do link CC e disponibiliza ao estágio CA. A chave S_{rede} descrita na Figura 4.15 é gerenciada pela GD e define o seu modo de operação.

Figura 4.15: GD testada experimentalmente.

Nesta forma de operação não há controle sobre a tensão da CaC, tampouco em relação ao ponto de operação da célula. O estágio CC apenas se limita a impor a tensão do link CC com o controle de tensão em cascata com a corrente de entrada. Ao mesmo tempo, o estágio CA é testado com as condições descritas neste capítulo, ou seja, com controle da tensão em cascata com a corrente para o modo ilhado e com controle em corrente para o modo conectado como descrito na Figura 4.9.

A Tabela 4.4 descreve os parâmetros utilizados no protótipo, sendo que os parâmetros do estágio CC e da CaC são os mesmos apresentados anteriormente na Tabela 3.2.

Tabela 4.4: Parâmetros utilizados experimentalmente.

Estágio	Parâmetro	Valor
CA	Tensão de fase (rms)	63,5 (V)
	Tensão do link CC	250 (V)
	Relação de transformação do transformador	2:1
	L_{gd}	2 m (H)
	R_c	10 (Ω)
	C	10 μ (F)
	L_r	5 m (H)

A Figura 4.16 ilustra o protótipo desenvolvido durante o período de doutorado para este projeto, mostrando na Figura 4.16 (a) o tanque de hidrogênio, na Figura 4.16 (b) a célula a combustível, na Figura 4.16 (c) o estágio CC e na Figura 4.16 (d) o estágio CA.

a

b

c

d

Figura 4.16: Visão geral do protótipo construído. Tanque de hidrogênio (a), CaC (b), estágio CC (c) e estágio CA (d).

4.7.1 Operação no modo ilhado

Com a chave S_{rede} aberta e a GD operando no modo ilhado, o protótipo desenvolvido é testado experimentalmente. A corrente e tensão da GD são apresentadas na Figura 4.17, sendo a inicialização da GD realizada em rampa com tempo de aproximadamente 1,5 s. Observa-se que há um sobressinal na inicialização da corrente salientada na Figura 4.17 (b), estando associado à dinâmica da malha interna de controle.

Já na Figura 4.18 é ilustrado o aspecto senoidal e a fase dos sinais da corrente e tensão da GD. A tensão da GD no PAC é de 63,5 V rms ou 90 V de pico, pois a conexão com a rede é feita através de um transformador com relação de 2:1. De forma semelhante, a Figura 4.19 ilustra o comportamento de duas fases da GD e a Figura 4.20 a tensão no link CC imposta pelo estágio CC.

A tensão e corrente da CaC são exibidas na Figura 4.21. Como não há controle direto sobre tais variáveis, toda transição que há no estágio CA reflete na corrente e tensão da CaC. Nota-se na Figura 4.21 (b) a presença de sobressinais tanto na tensão quanto na corrente da célula mesmo com a inicialização da GD sendo feita em rampa. Neste contexto, salienta-se que trabalhos como [41-43] já demonstraram o quanto transitórios impactam (negativamente) na vida útil e no consumo de combustível das células a combustível, sendo, portanto, importante evitar este tipo de manobra com CaC's.

Figura 4.17: Escala vertical: inicialização da GD (a) e detalhe da rampa de tensão (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Escala horizontal: 10 s/div (a) e 500 ms/div (b).

Figura 4.18: Escala vertical: inicialização da GD em rampa (a) e detalhe da tensão em fase com a corrente fase (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Escala horizontal: 200 ms/div (a) e 10 ms/div (b).

Figura 4.19: Escala vertical: duas fases da GD (a) e detalhe da defasagem da tensão e corrente de duas fases da GD (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (60 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da fase “b” da GD (60 V/div). Amarelo: corrente da fase “b” da GD (5 A/div). Escala horizontal: 1 s/div (a) e 10 ms/div (b).

Figura 4.20: Escala vertical: tensão do link CC na inicialização da GD em rampa. Verde: tensão do link CC (25 V/div). Escala horizontal: 500 ms/div.

Figura 4.21: Escala vertical: inicialização da CaC associada com a GD (a) e detalhe da tensão e corrente da CaC (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 10 s/div (a) e 500 ms/div (b).

A Figura 4.22 detalha a corrente e tensão na CaC em regime. Como resultado da estratégia de controle adotada, verifica-se uma oscilação em baixa frequência em ambos os sinais da célula. Esta oscilação é verificada e descrita na Figura 4.23 por meio do espectro em frequência do sinal da corrente da célula. De forma mais acentuada, são observadas amplitudes entre 3 - 4 Hz.

Como será detalhada no próximo capítulo, esta banda de frequência surge do acoplamento da malha de controle da tensão do link CC em cascata com o de corrente da CaC

e estão diretamente associadas à malha de controle do link CC. Assim, como será demonstrado no próximo capítulo, a retirada da malha em cascata e a adoção do controle de corrente da CaC elimina o aparecimento desta frequência e, por sua vez, parte da oscilação presente nos sinais de corrente e tensão da célula.

Figura 4.22: Escala vertical: tensão e corrente da CaC associada com a GD. Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 10 ms/div.

Figura 4.23: Espectro em frequência da corrente da CaC (experimental) para o controle ilhado.

A análise é seguida com manobras de cargas realizadas no PAC. A Figura 4.24 ilustra, de forma ampla, a inicialização e duas entradas e retiradas de carga no PAC e seus efeitos nas tensões e correntes da GD e da CaC. Ao mesmo tempo, a Figura 4.25 detalha as duas entradas de carga, sendo possível observar que em um ciclo a tensão da GD está estabilizada para

ambos os eventos. De forma semelhante, a Figura 4.26 traz em detalhes a primeira e a segunda retirada de carga.

Figura 4.24: Escala vertical: manobras de carga no PAC. Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (3 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 10 s/div.

Figura 4.25: Escala vertical: degraus de carga, primeiro degrau (a) e segundo degrau (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (25 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (1,5 A/div). Escala horizontal: 50 ms/div (a) e 20 ms/div (b).

Figura 4.26: Escala vertical: retirada de carga, primeira retirada (a) e segunda retirada (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (25 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (1,5 A/div). Escala horizontal: 50 ms/div (a).

Para as mesmas manobras de cargas realizadas no PAC, são ilustrados os impactos que se propagam na célula. Na Figura 4.27 é explicitado as solicitações de potência no PAC com a potência fornecida pela CaC (sinal marrom). Na Figura 4.28 e em detalhes na Figura 4.29 (a) e (b) é possível verificar a lenta dinâmica da CaC na recuperação da sua tensão. Da mesma forma, a Figura 4.29 (c) e (d) mostra um sobressinal em ambas retiradas de cargas, sendo mais destacado na Figura 4.29 (d), uma vez que a manobra de carga se aproxima da região ativa e cujas as perdas são maiores como apresentado no capítulo 3 e sumariado na Tabela 2.7.

Figura 4.27: Escala vertical: manobras de carga no PAC refletidas no estágio CC. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Marrom: Potência fornecida pela CaC (200 W/div). Roxo: corrente total da CaC (10 A/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor da CaC (10 A/div). Pink: corrente da fase “b” do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 10 s/div.

Figura 4.28: Escala vertical: tensão da CaC. Azul: tensão da CaC (1 V/div). Escala horizontal: 10 s/div.

a

b

c

d

Figura 4.29: Escala vertical: degraus (a) e (b) e retiradas (c) e (d) de carga. Tensão na CaC. Azul: tensão da CaC (1 V/div). Escala horizontal: 2 s/div.

A Figura 4.30 exibe os transitórios de corrente na CaC oriundos do PAC. Ainda que exista oscilação na transição de corrente como ilustra a Figura 4.30 (b), a malha interna de

controle de corrente do estágio CC melhora a dinâmica do sinal. Semelhante impacto na dinâmica da corrente da CaC é observado na retirada de carga no PAC como ilustra a Figura 4.31.

Figura 4.30: Escala vertical: degraus de corrente no PAC. Corrente da CaC (a) e detalhe da corrente associada a GD (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (3 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (2 A/div em (a) e 10 A/div em (b)). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 100 ms/div (b).

Figura 4.31: Escala vertical: retirada de carga no PAC. Corrente da CaC (a) e detalhe da corrente associada a GD (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (3 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (2 A/div em (a) e 10 A/div em (b)). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 100 ms/div (b).

4.7.2 Operação no modo conectado

Fechando a chave S_{rede} a GD inicia a sua operação no modo conectado. Após o controle validar a tensão e a frequência da rede, a referência do controle na operação ilhada aciona o algoritmo PLL e sincroniza a GD com a rede de distribuição.

A sincronização entre a GD e a rede de distribuição está ilustrada na Figura 4.32 (a) e Figura 4.32 (b). Na primeira ilustração, é possível observar a operação ilhada da GD e o instante em que a GD detecta a entrada da rede de distribuição e inicia a sua sincronização.

Observa-se que em cinco ciclos após o algoritmo de sincronização atuar, a GD está sincronizada com a rede de distribuição. Ressalta-se que neste momento a GD está sincronizada, porém não conectada na a rede de distribuição.

Figura 4.32: Escala vertical: sincronização da GD com a rede (a) e detalhe da GD e rede sincronizadas (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da fase “a” da rede (50 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 20 ms/div (a) e 10 ms/div (b).

Após a sincronização, a GD é conectada na rede de distribuição conforme é ilustrado na Figura 4.33. No momento da conexão, a GD continua entregando potência ao PAC, contudo como neste caso a potência da carga local consome toda a potência fornecida pela GD, a corrente absorvida e/ou injetada na rede (vermelha) é próximo de zero.

O momento da conexão é demonstrado na Figura 4.33 (a) e (b). Observa-se que a conexão com a rede é isenta de afundamentos de tensão, apenas no exato momento do chaveamento do relé nota-se um distúrbio na tensão e corrente da GD associado ao próprio chaveamento do relé.

Destaca-se que a conexão na rede implica no chaveamento do controle da GD. Contudo, através dos resultados apresentados, nota-se que a alteração da operação não afeta o desempenho da GD na transição.

Figura 4.33: Escala vertical: momento da conexão com a rede (a) e detalhe da conexão (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da fase “a” da rede (50 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 20 ms/div (a) e 4 ms/div (b).

O efeito da conexão entre a GD e a rede de distribuição no estágio CC é trazido na Figura 4.34. Considerando que a estratégia de controle no estágio CC não é alterada, após a conexão os sinais da célula não são modificados, da mesma forma que no instante da conexão não há transitórios consideráveis na CaC.

Figura 4.34: Escala vertical: momento da conexão com a rede no estágio CC (a) e detalhe da conexão (b). Verde: tensão do link CC (50 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

A ilustração da transferência de potência da CaC para a rede é exibida na Figura 4.35. A transferência de potência é realizada com a carga local absorvendo toda a potência fornecida pela CaC. Em um dado instante, é elevada, em rampa, a potência injetada pela GD no PAC e, ao mesmo tempo, a rede de distribuição começa a absorver o resíduo de potência não consumida pela carga local. Já em um segundo momento, a injeção de potência da GD é ajustada para suprir apenas a potência da carga local, tornando a injeção de potência na rede próxima de zero.

Assim como observado para a operação ilhada, no mesmo resultado da Figura 4.35 fica evidente a lenta dinâmica da célula a combustível no processo de transferência de potência à rede de distribuição. Mesmo após a transferência em rampa ser finalizada, a tensão ainda caminha no sentido do seu valor em regime. Igualmente, na retirada em rampa, há a presença de um sobressinal na tensão e um período de acomodação do seu valor.

Figura 4.35: Escala vertical: transferência de potência para a rede. Verde: tensão da fase “a” da GD (60 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Em detalhes a Figura 4.36 e Figura 4.37 exibem o comportamento dos sinais da CaC frente a injeção de potência na rede. Naturalmente, caso a injeção de potência na rede se prolongasse, a tensão da CaC seria estabilizada. Contudo, este comportamento descrito na Figura 4.36 e Figura 4.37 mostra a dificuldade de se operar uma GD que possua como fonte principal uma célula a combustível.

Figura 4.36: Escala vertical: transferência de potência para a rede com foco no estágio CC. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (5 A/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Figura 4.37: Escala vertical: transferência de potência para a rede com foco no estágio CC. Acréscimo (a) e decréscimo de potência (b). Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (5 A/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 200 ms/div.

Os sinais da GD e rede são trazidos na Figura 4.38. A distorção presente no sinal da tensão é proveniente da própria rede de distribuição, uma vez que a tensão está sendo imposta pela própria rede e não é controlada pela GD. Já a corrente na saída da GD (pink) tem aspecto senoidal, enquanto a corrente na entrada do transformador apresenta distorção devido a baixa qualidade do transformador da rede. Detalhes da distorção da corrente para este modo de

operação será abordada no próximo capítulo, juntamente com uma comparação com outros modos e estruturas propostas.

Figura 4.38: Escala vertical: detalhe da corrente injetada na rede. Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 10 ms/div.

Por fim, a análise dos resultados deste capítulo conduz a necessidade de aprimorar a estratégia de gerenciamento e controle da CaC, principalmente quando da ocorrência de transitórios no estágio CA. Nos próximos capítulos, propostas neste sentido são discutidas.

4.8 Considerações finais do capítulo 4

Este capítulo apresentou o estágio CA dentro do contexto de desenvolvimento de uma GD baseada em CaC. Nele é descrito uma estrutura de controle que servirá de base de comparação e análise para os próximos capítulos. Associado a isso, o modelo matemático para ambos os modos de operação, bem como uma breve análise em frequência foi apresentada.

Observou-se que em ambos os modos de operação a CaC está susceptível aos transitórios de carga, uma vez que, como observado nos resultados experimentais, não foi possível gerenciar e/ou controlar o ponto de operação da CaC. Esta limitação está associada a necessidade do estágio CC impor a tensão do link CC.

Frente ao objetivo de gerenciar a energia da célula, a estrutura clássica apresentada neste capítulo não permite tal operação. Assim, os próximos capítulos apresentarão propostas que permitirão o controle e gerenciamento da energia da CaC.

Capítulo 5

Gerenciamento da energia da CaC

A discussão em torno do gerenciamento da energia da CaC passa por diversos pontos de análise como, por exemplo, consumo de combustível, vida útil, arquitetura do estágio de potência e perfil de potência que se deseja injetar na rede de distribuição, bem como a própria gestão da sua potência gerada. Dentro do contexto deste trabalho, deseja-se definir uma variável, dentre as da CaC, que seja propícia para controlar e gerenciar a potência fornecida pela CaC, levando em consideração questões como a própria dinâmica da célula.

Assim, de forma a facilitar a tomada de decisão de qual variável da célula controlar para gerenciar a sua energia, é possível traçar um paralelo com a fixação da tensão e corrente e observar o comportamento da variável não fixada. A corrente nos terminais da CaC já foi utilizada como variável de controle nos capítulos iniciais deste trabalho, sendo observada a dinâmica da tensão para, inclusive, realizar a parametrização da célula. Neste cenário, os transitórios de corrente refletem uma dinâmica de tensão similar ao encontrada em um capacitor.

Desta forma, são realizados testes com tensão controlada, nos quais são realizados degraus de tensão nos terminais da CaC compreendendo toda a sua faixa de operação. A Figura 5.1 (a) ilustra o degrau de 28 V para 34 V, o que significa um alívio de carga. Neste resultado, a corrente estabiliza com um tempo superior a 60 s, apresentando uma dinâmica mais lenta quando comparada aos resultados obtidos no capítulo 2 com corrente controlada.

Já a Figura 5.1 (b) mostra o degrau de tensão de 34 V para 44 V, o que significa levar a corrente da CaC para zero. Diferentemente do resultado anterior, a corrente possui uma transição instantânea, o que é interessante para aplicações associada à GD. Assim como os resultados com corrente controlada, os resultados apresentados na Figura 5.1 demonstram uma dinâmica dependente da região de operação da CaC.

Figura 5.1: Escala vertical: degrau de tensão de 28 V para 34 V (a) e 34 para 44 V (b). Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Escala horizontal: 20 s/div.

Ao mesmo tempo, são realizadas retiradas de tensão em degrau, que possuem como consequência um aumento de corrente solicitada da CaC. Similarmente ao que ocorreu com o resultado da Figura 5.1 (b), o resultado da Figura 5.2 (a) apresenta uma dinâmica rápida. Este resultado está posicionado no início da curva de polarização da CaC (44 V para 34 V) e atinge uma corrente de aproximadamente 9,5 A em regime.

Por outro lado, o resultado da Figura 5.2 (a) percorre de 9 A até aproximadamente 32 A. Observa-se que de 9,5 A até 24 A, a CaC possui uma transição instantânea, sendo que após este valor de corrente, a dinâmica da célula se altera completamente. No total, são necessários 80 s para a estabilização da corrente, sendo a maior parte do tempo de acomodação compreendido de 24 até 32 A.

Figura 5.2: Escala vertical: degrau de tensão de 44 V para 34 V (a) e 34 para 28 V (b). Pink: corrente da CaC(x8) (500 mA/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div (a) e 20 s/div (b).

Além disso, aparecem recortes repetidos na corrente a cada 10 s. Tais recortes estão associados a purga do excesso de hidrogênio, que para esta CaC é automático. Como a corrente da CaC é proporcional a quantidade de combustível, na medida em que a célula eleva a quantidade de combustível solicitada, o processo de purga impacta no sinal de corrente. A Figura 5.3 exibe em detalhes o impacto do processo de purga na CaC quando uma elevada corrente é demandada na célula e não há controle da mesma.

Além dos recortes na corrente devido a purga, uma outra consequência da limitação da resposta dinâmica da CaC é o surgimento de um fenômeno associado a falta de combustível (em inglês, *fuel starvation*). Este fenômeno, a partir de transitórios de carga, provoca uma queda de curta duração na tensão da célula e pode ser prejudicial a sua vida útil [44-46].

Figura 5.3: Escala vertical: detalhe da corrente com o efeito da purga. Pink: corrente da CaC(x8) (100 mA/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Com base nos resultados apresentados, fica evidente a dinâmica característica que cada região de operação possui. Contudo, quando a corrente é fixada (resultados da Figura 2.11 até Figura 2.13) a alteração da dinâmica fica, basicamente, alterada em seu tempo de acomodação. Ao passo que ao deixar a corrente da CaC sem qualquer tipo de controle, além da alteração significativa da dinâmica, o comportamento da transição é alterado.

Observando o comportamento da resposta da célula, pode-se considerar que a corrente possui uma resposta dinâmica rápida até 24 A quando é fixado a tensão da CaC, porém acima destes valores o seu controle é imperativo.

Ainda que os resultados possam indicar um controle por estágios com alternância entre tensão e corrente, o controle da tensão da CaC em detrimento ao de corrente possui um maior

impacto na resposta dinâmica e implica em uma maior dificuldade em se gerenciar o seu ponto de operação.

Trabalhos como [47-49] empregam o controle de corrente de saída da célula, sendo que em [47] o controle de corrente associado ao fluxo de combustível é utilizado. Ainda que a aplicação esteja limitada somente ao estágio CC, o melhor desempenho da resposta transitória da corrente se refletiu, inclusive, em uma melhor resposta transitória do fluxo de combustível da CaC.

Sendo assim, as próximas seções deste capítulo apresentam estratégias que possibilitam o controle da corrente de saída da célula a combustível.

5.1 Gerenciamento da CaC para o modo conectado

De forma geral, os VSIs, operando conectados na rede de distribuição, utilizam como estratégia o controle da corrente e/ou potência no lado CA. Tal estratégia é conveniente desde que a tensão do link CC seja controlada pelo estágio CC.

Neste sentido, sabe-se que o fluxo de combustível em uma célula está relacionado com a sua corrente e que o comportamento da variável corrente implica na dinâmica de funcionamento da CaC e, conseqüentemente, em todo o seu processo eletroquímico de conversão de energia conforme [50, 51]. Desta forma, para uma GD baseada em CaCs é apropriado que o controle do estágio CC ajuste o fluxo de potência proveniente da célula, o que além de garantir uma operação adequada para a CaC, possibilita o gerenciamento da potência gerada pela mesma.

Assim, para que seja possível controlar a potência da CaC, o controlador do estágio CA é projetado de forma a regular a tensão do link CC a partir da variação de energia que flui pelo banco de capacitores. O objetivo é realizar o balanço de energia entre a potência disponibilizada pela CaC e a consumida no PAC. A diferença entre esta energia é injetada na rede de distribuição ou absorvida da rede, sendo este balanço definido pela expressão (5.1).

A ideia central é controlar a variação de energia que flui através do banco de capacitores do link CC, tornando possível o controle da corrente de entrada da CaC pelo estágio CC.

$$P_{CaC} - P_{perdas_CC} = \frac{dE_{Link_CC}}{dt} = P_{PAC} - P_{perdas_PAC} \quad (5.1)$$

Onde:

p_{CaC} : potência fornecida pela CaC (W);

p_{perdas_CC} : perdas associadas ao estágio CC (W);

E_{link_CC} : energia armazenada no capacitor (W);

p_{PAC} : potência no PAC (W);

p_{perdas_PAC} : perdas associadas ao estágio CA (W).

Desconsiderando as perdas, a equação que define o balanço de energia no link CC pode ser expressa pela equação (5.2).

$$\frac{dE_{link_CC}}{dt} = p_{CaC} - p_{PAC} \quad (5.2)$$

O diagrama do controle proposto para a GD conectado à rede de distribuição está representado na Figura 5.4. No diagrama, i_{dq_ref} são as correntes de referência no eixo direto e em quadratura geradas pelo controlador de tensão do link CC.

Figura 5.4: Diagrama simplificado do controle do link CC em cascata com o controle de corrente da GD para o modo conectado.

Em termos práticos, considerando que a tensão no estágio CA é imposta pela rede de distribuição, o controle proposto da Figura 5.4 ajusta o valor da corrente da GD e, por conseguinte, a potência do estágio CA. Assim, quando o ponto de operação da célula for

modificado, o controle altera o nível de corrente injetada na rede de distribuição, fazendo com que o fluxo de potência permaneça estável.

De forma geral, esta estratégia de controle está alinhada com os objetivos deste trabalho e pode ter suas contribuições sumarizadas da seguinte forma:

- ✓ A escolha por parte do produtor de energia em trabalhar no melhor cenário em relação ao custo da energia ou próximo a máxima potência da célula;
- ✓ O gerenciamento do custo da produção de energia, na qual a injeção de potência pode ocorrer com uma relação kWh/custo mais vantajosa;
- ✓ Viabilidade do controle da corrente da CaC;
- ✓ Os transitórios de cargas e contingências provenientes do estágio CA são eliminados com a rede de distribuição absorvendo parte dos transitórios.

Além disso, o perfil da energia injetada na rede de distribuição está associado ao perfil da energia que a CaC disponibilizar, o que dependendo da forma como o hidrogênio é obtido um perfil constante de injeção poderá se alcançado.

5.1.1 Modelagem da tensão do link CC

No controle proposto da Figura 5.4, as referências de corrente no eixo em quadratura e direto da GD são geradas através do controle de tensão do link CC. As quais podem ser definidas por (5.3).

$$i_{dq_gd_ref} = k_{p_l_cc} \varepsilon_{l_cc} + k_{i_l_cc} \int \varepsilon_{l_cc} dt \quad (5.3)$$

Sendo ε_{l_cc} o erro da tensão do link CC definido em (5.4).

$$\varepsilon_{l_cc} = v_{link_CC_ref} - v_{link_CC} \quad (5.4)$$

Considerando que a potência no PAC pode ser expressa por variáveis síncronas, obtém-se a seguinte expressão (5.5):

$$P_{PAC} = \frac{3}{2} (i_{d_PAC} v_{d_PAC} + i_{q_PAC} v_{q_PAC}) \quad (5.5)$$

Já a potência fornecida pelo estágio CC, que neste caso é a potência da CaC, pode ser expressa por (5.6), sendo i_0 a corrente de saída do conversor da célula e disponível no link CC conforme ilustra a Figura 5.4.

$$P_{CaC} = v_{link_CC} i_0 \quad (5.6)$$

Desconsiderando as perdas tanto no estágio CC quanto no CA, pode-se afirmar que o balanço de potência no link CC é dado por (5.7):

$$v_{link_CC} C_{cc} \frac{d}{dt} (v_{link_CC}) = v_{link_CC} i_0 - \frac{3}{2} (i_{d_PAC} v_{d_PAC} + i_{q_PAC} v_{q_PAC}) \quad (5.7)$$

Aplicando pequenos sinais e rearranjando a equação (5.7), tem-se (5.8).

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \left((I_{d_PAC} + \hat{i}_{d_PAC}) (V_{d_PAC} + \hat{v}_{d_PAC}) + (I_{q_PAC} + \hat{i}_{q_PAC}) (V_{q_PAC} + \hat{v}_{q_PAC}) \right) = \\ & (V_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}) (I_0 + \hat{i}_0) - (V_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}) C_{cc} \frac{d}{dt} (V_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Uma vez que o objetivo é encontrar uma função de transferência para pequenos sinais que relaciona a tensão do link CC com a corrente no eixo direto, as perturbações presentes no eixo em quadratura são negligenciadas. Assim, tem-se (5.9):

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} (V_{d_PAC} I_{d_PAC} + V_{d_PAC} \hat{i}_{d_PAC} + V_{q_PAC} I_{q_PAC}) = V_{link_CC} I_0 + \hat{v}_{link_CC} I_0 \\ & - V_{link_CC} C_{cc} \frac{d}{dt} (\hat{v}_{link_CC}) \end{aligned} \quad (5.9)$$

Rearranjando a equação (5.9) e separando regime permanente em relação a representação de pequenos sinais, encontra-se (5.10).

$$\begin{cases} \frac{3}{2}(V_{d_PAC}I_{d_PAC} + V_{q_PAC}I_{q_PAC}) = V_{link_CC}I_0 \\ \frac{3}{2}V_{d_PAC}\hat{i}_{d_PAC} = \hat{v}_{link_CC}I_0 - V_{link_CC}C_{cc} \frac{d}{dt}(\hat{v}_{link_CC}) \end{cases} \quad (5.10)$$

Uma possível solução para a equação (5.10), é considerar que a tensão máxima alcançada pela GD é a metade da tensão do link CC. Conforme exposto em [52], uma aproximação adequada é fazer $V_{link_CC} = \sqrt{3}V_{d_PAC}$. Esta consideração pode ser satisfatória para a operação conectada, uma vez que a tensão no PAC é imposta pela rede de distribuição e pode ser considerada constante. Outra aproximação realizada, é definir que (em regime permanente) $I_0 = V_{link_CC}/R_0$, sendo R_0 a representação da carga vista pelo estágio CC no link CC.

Assim, levando em consideração os comentários anteriores e utilizando a transformada de Laplace na expressão (5.10), obtém-se (5.11) que é a função de transferência que relaciona a corrente de saída da GD com a tensão do link CC.

$$\frac{\hat{v}_{link_CC}(s)}{\hat{i}_{d_PAC}(s)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{R_0}{(1 - R_0 C_{cc} s)} \quad (5.11)$$

5.1.2 Controladores de tensão do link CC

A malha de controle para a tensão do link CC é exibida na Figura 5.5. Em cascata com a malha de tensão, a malha de corrente é representada pelo ganho G_i , sendo a mesma apresentada no capítulo quatro pela Figura 4.9.

Figura 5.5: Malha de controle da tensão do link CC.

As variáveis apresentadas na Figura 5.5 são:

- k_{pcc} e k_{icc} : constantes proporcional e integral do controlador de tensão do link CC, respectivamente;
- G_i : representação da malha de corrente em cascata;
- H_{lcc} : ganho do sensor de tensão do link CC.

A Tabela 5.1 exibe os parâmetros utilizados para a obtenção das constantes do controlador PI. A resposta em frequência para o controle da tensão do link CC é ilustrada na Figura 5.6. O controlador é projetado com uma frequência de corte de 200 Hz e margem de fase de 70° como é ilustrado na resposta de malha aberta da Figura 5.6.

Tabela 5.1: Parâmetros de projeto do controlador de tensão do link CC.

Parâmetro	Valor
f_s	12 k (Hz)
mf	70°
f_{cl}	0,2 k (Hz)
H_{lcc}	0,002
R_0	62,5 (Ω)

Figura 5.6: Resposta em frequência em malha aberta do controle de tensão do link CC.

5.2 Resultados do gerenciamento da CaC para o modo conectado

A Figura 5.7 ilustra a GD testada em simulação e experimentalmente com as malhas principais de controle em destaque. A simulação é realizada em ambiente PSIM®, sendo os controles e algoritmos desenvolvidos em linguagem C utilizando o bloco de programação do próprio software. Os parâmetros utilizados em simulação e no protótipo experimental são os mesmos apresentados na Tabela 3.2 e Tabela 4.4. O controlador de corrente do conversor da CaC é calculado de acordo com a Tabela 3.1 e o controlador do link CC é projetado a partir dos parâmetros encontrados na Tabela 5.1.

Figura 5.7: GD simulado e testado experimentalmente para o gerenciamento da CaC no modo conectado.

Em um primeiro momento, a GD é inicializada no modo ilhado e posteriormente conectada na rede de distribuição através do acionamento da chave S_{rede} . Como descrito anteriormente, neste cenário a tensão do link CC passa a ser controlada pelo estágio CA, enquanto o estágio CC regula a corrente de saída da CaC.

O processo de conexão com a rede de distribuição com o arranjo do controle da tensão do link CC é destacado na Figura 5.8. Nota-se que a conexão é isenta de distúrbios, porém a corrente da rede não tem um aspecto senoidal como ilustra a Figura 5.8 (b), o que está associado a sua baixa amplitude.

Figura 5.8: Escala vertical: conexão no cenário com gerenciamento CC. Aspecto geral do estágio CA (a) e detalhe da conexão (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da fase “a” da rede (50 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (5 A/div). Escala horizontal: 1 s/div (a) e 20 ms/div (b).

Até o presente momento, três condições de operação da GD foram discutidas. Duas no capítulo anterior, nas quais a GD ora opera ilhada controlando a sua tensão de saída ou conectada controlando a sua própria corrente. A terceira condição é a apresentada neste capítulo, na qual a GD está conectada controlando a tensão do link CC.

Um meio de verificar o desempenho de cada operação é através da análise espectral dos sinais da GD. As análises espectrais do sinal experimental da corrente da GD para tais estratégias de controle estão ilustradas na Figura 5.9. Por meio das análises, evidencia-se que é na operação ilhada em que a distorção harmônica total da corrente da GD é menor com 1,38%, sendo com controle do ponto de operação da CaC a distorção vai a 4,08% e para o modo conectado a 3,73%. Como mostra a Figura 5.9, a terceira e quinta harmônica são as que mais influenciam na corrente da GD.

Ainda que o foco esteja centrado na análise da energia da CaC, observa-se que a adição da malha de tensão no controle da corrente da GD tem um impacto negativo quando comparado às outras estruturas.

Figura 5.11: Escala vertical: conexão no cenário com gerenciamento do ponto de operação da CaC. Azul: tensão da CaC (2,5 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (2,5 A/div). Escala horizontal: 500 ms/div.

O entendimento da oscilação na corrente da CaC, antes da transição do controle da GD, pode ser encaminhado pela análise espectral do sinal da corrente. Naturalmente, o conceito de distorção harmônica não se aplica neste caso, porém o exame em frequência do sinal da corrente da CaC pode ser empregado para o entendimento da origem de tal oscilação.

Observando que tanto para o modo ilhado quanto para o modo conectado a estrutura de controle da CaC é a mesma, ou seja, uma estrutura com controle de tensão em cascata com a corrente, são ilustradas apenas dois cenários. Os resultados para o controle em cascata (preto) servem, portanto, para o modo ilhado e conectado, sendo que os resultados do controle para o ponto de operação (amarelo) servem para a estrutura que controla a corrente da CaC.

Como já esperado, por meio da Figura 5.12 (a), observa-se que estão presentes os sinais de 12 kHz e 24 kHz no sinal de corrente da CaC para ambas as estruturas de controle. Contudo, em baixa frequência como é apresentado na Figura 5.12 (b), o sinal da corrente da CaC para estrutura em cascata se diferencia em uma banda de 2 – 4 Hz em relação a estrutura que controla a corrente da CaC. Esta banda pode ser compreendida pela interação entre a malha da tensão do link CC e a malha de corrente, pois na medida em que a malha de tensão do link CC é retirada, a banda de frequência inexistente e o sinal de corrente torna-se isento desta oscilação.

a

b

Figura 5.12: Espectro de frequência da corrente da CaC. 0 – 50 kHz em dB (a) e 0 – 10Hz (b).

Como parte integrante da GD, a tensão do link CC no instante do chaveamento do controle é trazida para análise com o resultado experimental da Figura 5.13. Com desvio imperceptível, a tensão passa a ser controlada pelo estágio CA, permitindo o gerenciamento da energia da CaC através do controle de sua corrente de entrada. Detalhes do desempenho do controle da tensão do link CC relacionando-o com o gerenciamento da CaC são abordados na próxima seção, os quais permitirão por meio de manobras de carga uma melhor análise da proposta.

Figura 5.13: Escala vertical: momento da conexão no cenário com gerenciamento CC. Verde: tensão do link CC (10 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (1 A/div). Escala horizontal: 1 s/div.

Por fim, a análise do espectro de frequência para o sinal de tensão confirma o apresentado anteriormente, uma vez que a Figura 5.14 ilustra uma banda entre 2 – 4 Hz para as duas estruturas de controle que possuem a tensão do link CC em cascata com a corrente da CaC. Já para o sinal em amarelo em que a tensão do link CC está em cascata com a corrente do estágio CA, a oscilação é reduzida e deslocada para banda entre 5 – 10Hz, porém não se propaga para a corrente da GD.

Figura 5.14: Espectro de frequência da tensão do link CC.

5.2.1 Gerenciamento do ponto de operação

Uma estratégia de controle adequada para a célula necessita observar a sua dinâmica de operação, principalmente quando da ocorrência de variações de carga e contingências diversas ligadas ao estágio CA, adotando procedimentos que protejam a sua operação. De maneira geral, a célula é projetada a atuar na região linear de operação, ainda que esta região não apresente a máxima potência de saída fornecida pela célula.

A ideia central no desenvolvimento do controle da GD neste trabalho é que, sendo o controle capaz de deslocar (gerenciar) o ponto de operação da célula, seja possível gerenciar a CaC para o ponto de máxima potência ou mínimo consumo, por exemplo, quando for conveniente à GD. O objetivo é que seja possível extrair uma relação custo benefício ótima, considerando o custo da produção de energia entre outros aspectos.

A utilização dessa metodologia de controle/gerenciamento se justifica, por exemplo, ao fato da energia produzida no horário de ponta, das 18 h às 20 h, possuir um custo maior do que fora do horário de ponta. Além disso, esta flexibilidade pode representar um “alívio” ao sistema elétrico de potência, já que no horário de ponta a rede de distribuição pode, eventualmente, estar operando no limite de sua capacidade de geração.

A Figura 5.15 representa o gerenciamento proposto para a energia gerada pela CaC, cujo deslocamento no sentido de P_1 para P_2 representa um aumento no fornecimento de potência pela CaC e é realizado pela atuação do controlador de corrente de entrada do estágio CC. Esta característica confere as gerações distribuídas que utilizam células a combustível, uma maior flexibilidade de operação e gerenciamento da energia produzida.

Figura 5.15: Curva teórica de polarização ($V \times I$) e ($P \times I$) para um acréscimo ou decréscimo de potência da CaC.

Além disso, o controle da corrente/potência de saída da CaC representa, conforme apresentada na seção anterior, uma redução nas oscilações provenientes do estágio CA, além de eliminar perturbações de entrada e saída de carga no PAC, já que a corrente é fixada pelo estágio CC.

De forma a ilustrar o gerenciamento da potência gerada pela CaC, o ponto de operação da célula é deslocada de diferentes formas e níveis de potência conforme apresentado na Figura 5.16. Em um primeiro momento, a potência da CaC é reduzida em degrau e em duas etapas, do ponto P_2 para P_1 e do ponto P_1 para P_0 . Após isso, a potência injetada pela CaC é aumentada da mesma forma que na anterior.

Por fim, em rampa a potência é retirada e injetada na GD. Estes movimentos em relação ao ponto de operação exemplificam diferentes dinâmicas de gerenciamento da potência gerada pela célula e possuem como objetivo analisar o comportamento da CaC nestas situações.

Naturalmente, estes movimentos do ponto de operação estariam associados a uma escolha da GD e/ou usuário. Tais razões poderiam estar associadas ao custo da produção de energia, por exemplo, porém neste trabalho o interesse está na análise da dinâmica da célula e no seu gerenciamento eletrônico e não nas razões que levaram à alteração do ponto de operação.

Figura 5.16: Potência da CaC em diversos pontos de operação (simulação).

Neste sentido, a Figura 5.17 exibe o comportamento para a tensão e corrente da CaC em toda a faixa de operação da célula. Na Figura 5.17 (a) é ilustrada a dinâmica da tensão da célula, elevando a tensão na retirada de carga e reduzindo o seu valor com a injeção de

energia na GD. Por outro lado, a Figura 5.17 (b) apresenta o comportamento da corrente. De forma a validar o estudo realizado por meio de simulações, a Figura 5.18 apresenta a tensão e corrente para a CaC, sendo que o cenário é o mesmo discutido no início deste parágrafo.

Figura 5.17: Escala vertical: diferentes pontos de operação da CaC. Tensão da CaC (a) e corrente da CaC (b). Azul: tensão da CaC (2,5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (2 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Figura 5.18: Diferentes pontos de operação da CaC. Tensão da CaC (a) e corrente da CaC (b) (simulação).

De forma a se ter uma visão geral do cenário com controle do ponto de operação da CaC, são adicionados na Figura 5.19 os sinais de corrente e tensão da GD e na Figura 5.20 as correntes por fase do conversor, a corrente total drenada da CaC e, por fim, a potência gerenciada da CaC injetada no estágio CA. Para conhecimento dos valores envolvidos nos

Figura 5.19: Escala vertical: visão geral do gerenciamento da energia da CaC. Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (5 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente da CaC (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Figura 5.20: Escala vertical: visão geral do gerenciamento da energia da CaC. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Azul escuro: corrente total da CaC (5 A/div). Laranja: potência da CaC (200 W/div). Pink: corrente da fase “b” do conversor CC (5 A/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor CC (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

O deslocamento do ponto de operação da CaC em degrau é representado na Figura 5.21. As duas manobras estão detalhadas na Figura 5.21 (b) e (c). Observa-se que a corrente da CaC apresenta um sobressinal no deslocamento do ponto de operação. Contudo, estas

manobras servem para demonstrar o desempenho da CaC, uma vez que na prática o recomendável para a célula é movimentar o ponto de operação em rampa como demonstrado na Figura 5.17.

a

b

c

Figura 5.21: Escala vertical: gerenciamento da energia da CaC em degraus (a) e detalhe da corrente na saída (b) e entrada (c) de carga. Pink: corrente da fase “b” do conversor CC (5 A/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor CC (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

A dinâmica da corrente do estágio CA está exposta na Figura 5.22. Conforme observado na Figura 5.22 (a), na medida em que a energia disponibilizada pela CaC é alterada, a corrente do estágio CA é modificada de forma a manter estável a tensão do link CC. Como a carga no PAC é constante, o restante da corrente solicitada pela carga é fornecida pela rede de distribuição.

A apresentação em detalhes das correntes da GD e da rede estão ilustradas na Figura 5.22 (b) e (c). Por meio dos resultados experimentais fica evidenciado que a GD não é capaz de fornecer corrente senoidal com valores baixos (0,5 A) conforme demonstra a Figura 5.22 (b). Porém na medida em que a corrente injetada na rede é elevada, o aspecto senoidal é retomado como ilustra o resultado da Figura 5.22 (c). De forma a suportar a análise realizada em simulação, a Figura 5.23 traz a dinâmica das correntes da rede e GD.

Em boa medida, a distorção na corrente da rede de distribuição está associada a baixa qualidade do transformador utilizado e as próprias distorções presente na rede de distribuição.

Figura 5.22: Escala vertical: dinâmica do estágio CA com o gerenciamento da CaC. Aspecto geral (a) e detalhe da corrente da GD e rede (b) e (c). Verde: tensão da fase “a” da GD (50 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (3 A/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (3 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

De forma análoga aos resultados apresentados na Figura 5.22 e Figura 5.23, é possível estender esta situação a um cenário em que a potência da CaC é fixada e a carga no PAC é

alterada. Neste cenário, a transição e o distúrbio não são propagados para a CaC, mas sim absorvidos pela rede de distribuição.

Figura 5.23: Corrente do estágio CA (a) e detalhe Corrente do estágio CA (b) para diferentes pontos de operação (simulação).

Por sua vez, a dinâmica da tensão do estágio CA é ilustrada na Figura 5.24. Sendo a tensão em um dos instantes de transição ilustrado na Figura 5.24 (b). Como neste modo de operação a tensão é imposta pela rede de distribuição, mesmo nas transições do estágio CC geradas pelo deslocamento do ponto de operação da CaC a tensão é equilibrada e isenta de distúrbios. Novamente para associar o resultado de simulação ao obtido experimentalmente, a Figura 5.25 mostra o resultado de simulação para um ponto de operação da CaC.

Figura 5.24: Escala vertical: tensão do estágio CA. Aspecto geral (a) e detalhe da tensão da GD (b). Verde: tensão da fase “a” da GD (25 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (2,5 A/div). Vermelho: corrente da fase “a” da rede (2,5 A/div). Escala horizontal: 40 ms/div (a) e 10 ms/div (b).

Por fim, o desempenho do controle da tensão do link CC é analisado experimentalmente na Figura 5.26 e em simulação na Figura 5.27. Com dinâmicas semelhantes em ambas as análises, a variação na tensão para os deslocamentos do ponto de operação da CaC são de 1,6% (4 V) tanto para a simulação quanto para os resultados experimentais, sendo que para as transições em rampa não foram observadas variações consideráveis na tensão.

Figura 5.27: Tensão link CC para diferentes pontos de operação (simulação).

Uma breve comparação entre os resultados obtidos neste capítulo com aqueles do capítulo 4 mostram que, com o gerenciamento da energia da célula, a CaC não mais está susceptível a transitórios do estágio CA. Tal observação pode ser aferida quando comparado o resultado da Figura 4.35 em relação ao da Figura 5.17.

Além disso, a oscilação na corrente e tensão da CaC foi reduzida como mostra a Figura 5.10 e Figura 5.11, embora a inclusão da malha de controle da tensão do link CC em cascata com a corrente da GD tenha aumentado a distorção na corrente da GD.

5.3 Gerenciamento da CaC para o modo ilhado

Diferentemente de fontes de energia que dependem de agentes externo como a radiação solar e a velocidade do vento para a produção de energia elétrica, a CaC consegue fornecer energia com um perfil de carga constante para a rede de distribuição ou carga local. Esta afirmação é válida, uma vez que se considere que há disponibilidade de hidrogênio para a CaC, pois dependendo da estrutura de armazenamento do combustível, o fornecimento de combustível para a CaC pode ser obtido através de estágios que dependam de agentes como a radiação solar e/ou velocidade do vento como descrito em [53, 54].

Assim, para o modo de operação ilhada, a dificuldade em se operar com a célula se concentra em absorver os transitórios provenientes do estágio CA. Além dos transitórios serem gerenciados pelo estágio CC, neste modo de operação a tensão no link CC é regulada pelo estágio CC, o que é mais um limitante para a operação da CaC.

Considerando que não há fonte complementar no estágio CC, a CaC, necessariamente, precisa controlar a tensão do link CC, o que resulta em uma configuração igual àquela já apresentada e discutida no capítulo 4.

Por meio do cenário descrito acima, conclui-se que a utilização de armazenadores seja imperativa em gerações distribuídas que operam com CaC. Deste modo, este trabalho desenvolve no próximo capítulo, estratégias de gerenciamento e controle que associam a célula à armazenadores de energia.

5.4 Considerações finais do capítulo 5

Este capítulo apresentou, em condições iniciais, a estratégia de gerenciamento para a CaC. É descrito uma estrutura de controle para o modo conectado que permite o gerenciamento do ponto de operação da célula, independentemente, da carga no PAC e da rede de distribuição.

Com base nos resultados apresentados, foi possível observar uma melhor resposta dinâmica da CaC na operação conectada e a redução da oscilação em seu sinal de corrente e tensão logo na alteração da estrutura de controle.

Já para o modo ilhado, identificou-se a necessidade de adição de armazenadores de energia para a operação adequada da CaC. Assim, foram descritos de forma breve os próximos passos que serão adotados neste trabalho.

Capítulo 6

Gerenciamento da energia da CaC com armazenadores de energia

Em uma breve perspectiva dos capítulos anteriores, a discussão relativa ao gerenciamento da energia da CaC ocorreu com base na GD conectada à rede e sem o emprego de armazenadores de energia. Ao término do último capítulo, foi observado que na operação ilhada o uso de armazenadores, além de flexibilizar a gestão do estágio CC, permite o gerenciamento tanto em transitórios quanto em regime permanente além de viabilizar a operação no modo ilhado.

Desta forma, é introduzido na estrutura do estágio CC um conjunto de armazenadores associados a um conversor bidirecional, o que permite a apresentação de duas arquiteturas básicas de controle. A primeira, para absorver transitórios no link CC provenientes do estágio CA e proteger a CaC de tais transitórios, sendo a CaC a fonte responsável pela operação em regime.

Ainda considerando a célula como fonte principal, é trazida uma segunda proposta que, além de operar no transitório e proteger a CaC, atua em regime permanente compartilhando a potência do estágio CC entre a CaC e o armazenador de energia.

Dentro deste contexto, muitos trabalhos envolvendo células a combustível têm sido desenvolvidos e discutidos na literatura. Em muitos deles, a CaC é parte integrante do estágio CC, o qual é comumente composto por armazenadores e outras fontes de energia como painéis fotovoltaicos e geradores eólicos. Tais métodos de integração são denominados de estruturas híbridas e operam com diferentes fontes de energia em uma GD, ou até mesmo em microrredes que podem estar conectadas ou não à rede de distribuição.

Em se tratando do controle da CaC, de forma geral, duas estratégias de controle para as células são encontradas na literatura. A primeira estratégia possui como objetivo o controle

do fluxo dos combustíveis como o hidrogênio e o oxigênio, sendo o controle do consumo de hidrogênio e, principalmente, a prevenção contra o surgimento do fenômeno associado à falta de combustível (em inglês, *fuel starvation*) os principais trabalhos encontrados [55-57]. A principal desvantagem desta estratégia, está ligada a lenta dinâmica dos dispositivos que controlam o fluxo dos combustíveis (compressores, ventiladores e válvulas) quando comparados aos transitórios de carga.

Por outro lado, a segunda estratégia encontrada na literatura se caracteriza pelo emprego de armazenadores de energia (baterias ou ultracapacitores) para operar em paralelo com a CaC, os quais permitem fornecer uma dinâmica adequada durante transitórios de carga [58, 59].

Já a estratégia desenvolvida neste trabalho, vincula a dinâmica da CaC com a própria estrutura de gerenciamento. Tal fato garante que todo o movimento do ponto de operação da CaC seja realizado em concordância com uma dinâmica predeterminada, uma vez que a dinâmica da CaC pode ser extraída.

Como consequência, a estratégia de gerenciamento proposta é determinada com base na área correspondente a potência fornecida pela CaC e a absorvida ou fornecida pelo armazenador, uma vez que o somatório da potência da CaC e do armazenador deve ser igual àquela solicitada pelo estágio CA. A Figura 6.1 ilustra o descrito acima.

Figura 6.1: Ilustração da área de potência para o gerenciamento do estágio CC.

Assim, nas próximas seções serão detalhadas as estruturas propostas para o gerenciamento da CaC e armazenador. Inicialmente, é apresentada uma revisão relativa ao gerenciamento com células a combustível. Na sequência o modelo desenvolvido é

apresentado e, por fim, as propostas de gerenciamento são trazidas e discutidas por meio de resultados de simulação e experimental.

6.1 Conversor bidirecional empregado

Como estratégia para o controle do fluxo de potência do armazenador de energia, é empregado o conversor bidirecional abaixador-elevador de tensão convencional descrito na Figura 6.2. Esse conversor se soma ao conversor *interleaved* utilizado para processar a energia da CaC e compõem o estágio CC.

Para a análise dinâmica do conversor bidirecional, são consideradas a resistência interna do armazenador e as resistências parasitas dos elementos passivos que o compõem.

Figura 6.2: Conversor bidirecional abaixador-elevador com o armazenador de energia.

Na modelagem do conversor em espaço de estados, considera-se que o vetor de estados seja composto pelas variáveis associadas aos elementos armazenadores de energia (6.1), enquanto o vetor de entrada seja dado por (6.2) e o vetor de saída por (6.3).

$$\mathbf{x} = [v_{cc} \quad v_{cAr} \quad i_{lAr}]^T \quad (6.1)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} i_{link} \\ v_{Ar} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} i_{Ar} \\ i_{lAr} \\ v_{link_CC} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Considerando que existem dois intervalos de chaveamento para o conversor em análise, sendo o estado da chave S_2 complementar ao estado da chave S_1 , o primeiro intervalo de chaveamento ocorre com a chave S_1 fechada e o segundo intervalo de chaveamento se dá por meio do fechamento da chave S_2 .

O intervalo de chaveamento para a chave S_1 fechada está representado pelo circuito da Figura 6.3.

Figura 6.3: Circuito do conversor bidirecional para a chave S_1 fechada.

Aplicando as leis de Kirchhoff das correntes e tensões ao diagrama da Figura 6.3, obtêm-se as equações de (6.4) a (6.7).

$$C_{cc} \frac{d}{dt}(v_{cc}) = -i_{cc} \quad (6.4)$$

$$v_{Ar} - i_{Ar}R_{Ar} - i_{cAr}R_{cAr} - v_{cAr} = 0 \quad (6.5)$$

$$v_{cAr} + i_{cAr}R_{cAr} - i_{lAr}R_{lAr} - L_{Ar} \frac{d}{dt}(i_{lAr}) = 0 \quad (6.6)$$

$$i_{cAr} = C_{Ar} \frac{d}{dt}(v_{cAr}) \quad (6.7)$$

Assim, a equação de estado média para o primeiro intervalo de chaveamento pode ser representada pela equação (6.8), sendo a matriz de estado e de entrada dadas pelas equações (6.8) e (6.9), respectivamente.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_I \mathbf{x} + \mathbf{B}_I \mathbf{u} \quad (6.8)$$

$$\mathbf{A}_I = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{C_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} & \frac{-R_{Ar}}{C_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} \\ 0 & \frac{R_{Ar}}{L_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} & \frac{-(R_{Ar}R_{lAr} + R_{cAr}R_{lAr} + R_{cAr}R_{Ar})}{L_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

$$\mathbf{B}_I = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{cc}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} \\ 0 & \frac{R_{Ar}}{L_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Já a saída para o primeiro intervalo de chaveamento pode ser representada pela equação (6.11) e a matriz de saída e de transmissão direta pela equação (6.12).

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_I \mathbf{x} + \mathbf{D}_I \mathbf{u} \quad (6.11)$$

$$C_I = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{(R_{Ar} + R_{cAr})} & \frac{R_{cAr}}{(R_{Ar} + R_{cAr})} \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_I = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{(R_{Ar} + R_{cAr})} \\ 0 & 0 \\ -R_{cc} & 0 \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Para o segundo intervalo de chaveamento, com a chave S_2 conduzindo, a Figura 6.4 representa o circuito equivalente.

Figura 6.4: Circuito do conversor bidirecional para a chave S_2 conduzindo.

Semelhante ao realizado anteriormente, aplica-se as leis de Kirchhoff das correntes e tensões ao diagrama da Figura 6.4, obtendo-se as equações de (6.13) a (6.17).

$$i_{link} = i_{lAr} - i_{cc} = i_{lAr} - C_{cc} \frac{d}{dt}(v_{cc}) \quad (6.13)$$

$$i_{Ar} = i_{lAr} + i_{cAr} \quad (6.14)$$

$$v_{Ar} - i_{Ar}R_{Ar} - i_{cAr}R_{cAr} - v_{cAr} = 0 \quad (6.15)$$

$$i_{cAr} = C_{Ar} \frac{d}{dt}(v_{cAr}) \quad (6.16)$$

$$v_{Ar} - i_{Ar}R_{Ar} - i_{lAr}R_{lAr} - L_{Ar} \frac{d}{dt}(i_{lAr}) - i_{cc}R_{cc} - v_{cc} = 0 \quad (6.17)$$

A equação de estado média para o segundo intervalo de chaveamento está representada na equação (6.18) e a matriz de estado e de entrada dada pelas equações (6.19) e (6.20), respectivamente.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{B}_2 \mathbf{u} \quad (6.18)$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{C_{cc}} \\ 0 & \frac{-1}{C_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} & \frac{-R_{Ar}}{C_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} \\ \frac{-1}{L_{Ar}} & \frac{R_{Ar}}{L_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} & \frac{-(R_{Ar}R_{lAr} + R_{cAr}R_{lAr} + R_{cAr}R_{Ar} + R_{cc}R_{Ar} + R_{cc}R_{cAr})}{L_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{cc}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} \\ \frac{R_{cc}}{L_{Ar}} & \frac{R_{Ar}}{L_{Ar}(R_{Ar} + R_{cAr})} \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

Já a saída para o segundo intervalo de chaveamento pode ser representada pela equação (6.21) e a matriz de saída e transmissão direta pela equação (6.22).

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_2 \mathbf{x} + \mathbf{D}_2 \mathbf{u} \quad (6.21)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{(R_{Ar} + R_{cAr})} & \frac{R_{cAr}}{(R_{Ar} + R_{cAr})} \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & R_{cc} \end{bmatrix}, \quad D_2 = D_I = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{(R_{Ar} + R_{cAr})} \\ 0 & 0 \\ -R_{cc} & 0 \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

Com os dois intervalos de chaveamento conforme descrito anteriormente, são obtidas, portanto, duas matrizes de estados (A_1, A_2) , duas matrizes de entradas (B_1, B_2) , duas matrizes (C_1, C_2) e duas matrizes (D_1, D_2) , sendo $D_1 = D_2$.

Durante o primeiro e o segundo intervalo de chaveamento, têm-se as seguintes relações (6.23).

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 x + B_1 u, & (k)T_S \\ y = C_1 x + D_1 x, & (k)T_S \end{cases} \quad (6.23)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = A_2 x + B_2 u, & (1-k)T_S \\ y = C_2 x + D_2 x, & (1-k)T_S \end{cases}$$

Portanto, a operação matricial que fornece a matriz de estados média do conversor em um período completo de comutação é dada pela equação (6.24).

$$\begin{cases} \dot{x} = [A_1 k + A_2 (1-k)] x + [B_1 k + B_2 (1-k)] u \\ y = [C_1 k + C_2 (1-k)] x + [D_1 k + D_2 (1-k)] u \end{cases} \quad (6.24)$$

Semelhante ponderação realizada no capítulo 3 com o conversor *interleaved* faz-se necessário com o conversor bidirecional. Neste sentido, a inserção da perturbação no vetor de entrada se propaga ao vetor de estados e ao vetor de saída, o que leva o ciclo de trabalho k se modificar de ciclo em ciclo em torno do ponto de linearização. Desta forma, tem-se $k = K + \hat{k}$, sendo K o valor médio em regime permanente e $\hat{k}$ o valor CA em torno do ponto de linearização. Assim, aplicando pequenos sinais na equação de estados (6.24) chega-se na equação (6.25).

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{X}} = \left[\mathbf{A}_I (K + \hat{k}) + \mathbf{A}_2 (1 - K - \hat{k}) \right] (\mathbf{X} + \hat{\mathbf{x}}) + \left[\mathbf{B}_I (K + \hat{k}) + \mathbf{B}_2 (1 - K - \hat{k}) \right] (\mathbf{U} + \hat{\mathbf{u}}) \\ \hat{\mathbf{y}} + \mathbf{Y} = \left[\mathbf{C}_I (K + \hat{k}) + \mathbf{C}_2 (1 - K - \hat{k}) \right] (\mathbf{X} + \hat{\mathbf{x}}) + \left[\mathbf{D}_I (K + \hat{k}) + \mathbf{D}_2 (1 - K - \hat{k}) \right] (\mathbf{U} + \hat{\mathbf{u}}) \end{cases} \quad (6.25)$$

Avaliando que as multiplicações entre as variáveis CA são muito pequenas, ou seja, $\hat{\mathbf{x}}\hat{k} \ll 1$ e que $\dot{\mathbf{X}} = 0$, tem-se:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_n \mathbf{X} + \mathbf{B}_n \mathbf{U} + \left[(\mathbf{A}_I - \mathbf{A}_2) \mathbf{X} + (\mathbf{B}_I - \mathbf{B}_2) \mathbf{U} \right] \hat{k} + \mathbf{A}_n \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_n \hat{\mathbf{u}} \\ \hat{\mathbf{y}} + \mathbf{Y} = \mathbf{C}_n \mathbf{X} + \mathbf{D}_n \mathbf{U} + \left[(\mathbf{C}_I - \mathbf{C}_2) \mathbf{X} + (\mathbf{D}_I - \mathbf{D}_2) \mathbf{U} \right] \hat{k} + \mathbf{C}_n \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{D}_n \hat{\mathbf{u}} \end{cases} \quad (6.26)$$

Onde,

$$\begin{cases} \mathbf{A}_n = \mathbf{A}_I K + \mathbf{A}_2 (1 - K) \\ \mathbf{B}_n = \mathbf{B}_I K + \mathbf{B}_2 (1 - K) \\ \mathbf{C}_n = \mathbf{C}_I K + \mathbf{C}_2 (1 - K) \\ \mathbf{D}_n = \mathbf{D}_I K + \mathbf{D}_2 (1 - K) \end{cases} \quad (6.27)$$

Em regime permanente os valores das variáveis de estado são constantes, por conseguinte a derivada do vetor de estados em regime permanente é nula (6.28). Além disso, o interesse reside sobre o ciclo de trabalho em torno do ponto linearizado $\hat{k}$, assim tem-se que $\hat{\mathbf{u}} = 0$ e chega-se em (6.29).

$$\begin{cases} 0 = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{U} \\ \mathbf{X} = -\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \mathbf{X} + \mathbf{D} \mathbf{U} \end{cases} \quad (6.28)$$

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_n \hat{\mathbf{x}} + \left[(\mathbf{A}_I - \mathbf{A}_2) \mathbf{X} + (\mathbf{B}_I - \mathbf{B}_2) \mathbf{U} \right] \hat{k} \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}_n \hat{\mathbf{x}} + \left[(\mathbf{C}_I - \mathbf{C}_2) \mathbf{X} + (\mathbf{D}_I - \mathbf{D}_2) \mathbf{U} \right] \hat{k} \end{cases} \quad (6.29)$$

Neste momento, considerando que o valor CA do ciclo de trabalho $\hat{k}$ é uma nova entrada e $\mathbf{R}$ o resultado da operação matricial $(\mathbf{A}_I - \mathbf{A}_2)\mathbf{X} + (\mathbf{B}_I - \mathbf{B}_2)\mathbf{U}$, obtém-se (6.30).

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_n \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{R} \hat{k} \quad (6.30)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação e rearranjando os termos da equação (6.30), é possível encontrar (6.31).

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_n \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{R} \hat{k} \\ s\hat{\mathbf{x}}(s) = \mathbf{A}_n \hat{\mathbf{x}}(s) + \mathbf{R} \hat{k} \\ \hat{\mathbf{x}}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{R} \hat{k} \end{cases} \quad (6.31)$$

Como é de interesse a obtenção apenas das funções de transferência que possuam a entrada como sendo a variação do ciclo de trabalho em torno do ponto linearizado, chega-se na equação (6.32).

$$\begin{cases} \hat{i}_{lAr} = \mathbf{C}_{ilAr} \hat{\mathbf{x}}(s) \\ \mathbf{C}_{ilAr} = [0 \quad 0 \quad 1] \end{cases} \quad (6.32)$$

Por fim, são obtidas as funções de transferência da corrente de entrada do armazenador em relação ao ciclo de trabalho em torno do ponto de linearização (6.33).

$$G_{i_lAr}(s) = \frac{\hat{i}_{lAr}}{\hat{k}} = \mathbf{C}_{ilAr} (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{R} \quad (6.33)$$

6.1.1 Controlador do conversor bidirecional

Neste momento, é de interesse apresentar a análise do controle de corrente do conversor bidirecional, uma vez que o controle da tensão do link CC, a partir da inserção do armazenador no estágio CC, será compartilhado entre a CaC e o próprio armazenador. Assim,

a análise em frequência para o controle da tensão do link CC será descrita na sequência deste capítulo.

Desta forma, com a função de transferência da corrente de entrada do armazenador em relação ao ciclo de trabalho (6.33), a obtenção das constantes dos controladores ocorre por meio da malha de controle de corrente exibida na Figura 6.3.

Figura 6.5: Malha de controle da corrente do armazenador.

Onde as variáveis apresentadas na Figura 6.5 são:

$PI_{i_{lAr}}$: constantes proporcional e integral do controlador de corrente do armazenador;

k : ciclo de trabalho;

$G_{i_{lAr}}$: função de transferência da corrente do armazenador (representada pelo conversor);

H_{Ar} : ganho do sensor de corrente.

A Tabela 6.1 mostra os principais parâmetros utilizados para a obtenção das constantes do controlador PI do conversor bidirecional.

Tabela 6.1: Parâmetros de projeto do controlador de corrente do armazenador.

Parâmetro	Valor
f_s	12 k (Hz)
mf	60 (°)
f_{cl}	1,0 k (Hz)
H_{Ar}	0,1

A Figura 6.6 (a) ilustra a resposta em frequência de malha aberta para uma frequência de corte de 1 kHz e margem de fase de 60°.

Figura 6.6: Resposta em frequência do controle de corrente do armazenador em malha aberta.

6.2 Gerenciamento da energia da CaC e armazenador no transitório

A base para o desenvolvimento do modelo proposto pode ser ilustrado por meio da Figura 6.7. Especificamente na Figura 6.7 (a) é exibido uma solicitação de carga em degrau proveniente do estágio CA, sendo que o estágio CC responde a esta solicitação conforme a Figura 6.7 (b). Nesta figura, a potência disponibilizada pela CaC é fornecida com uma dinâmica preestabelecida enquanto que, o armazenador ou o conjunto deles absorve o transitório com um tempo de resposta atrelado ao da CaC, ou seja, a potência solicitada aos armazenadores é complementar a da CaC e o seu ajuste é realizado por meio da própria dinâmica da CaC como será detalhado em seguida.

De forma semelhante, a Figura 6.7 (c) ilustra a retirada de carga no PAC. Nesta condição o armazenador de energia ainda é o responsável pelo transitório, uma vez que para a estratégia proposta, toda a variação de energia sobre a célula a combustível ocorrerá com uma dinâmica pré-determinada conforme a é ilustrado na Figura 6.7 (d).

Figura 6.7: Ilustração da área de potência para a estratégia de gerenciamento no transitório.

Em termos matemáticos, a primeira consideração a ser observada pode ser expressa pela equação (6.34), a qual indica a potência total do estágio CC.

$$P_{cc} = P_{CaC} + P_{Ar} \quad (6.34)$$

Ainda considerando a Figura 6.7, observa-se que a potência fornecida pela CaC, para a estratégia proposta, deve ser uma parcela da potência solicitada, assim associa-se a potência da CaC a variável n_d . A variável n_d pode ser compreendida como um valor que relacione, numericamente, a quantidade de potência da CaC e do armazenador ao estágio CC ou representar a dinâmica da CaC.

Assim, considerando que n_d represente a dinâmica da CaC, a equação (6.35) traz a parcela de potência correspondente a CaC e ao armazenador para compor o estágio CC. Se for observado que n_d fornece a dinâmica “lenta” à parcela de potência da CaC, $(1-n_d)$ corresponde a dinâmica “rápida” necessária ao estágio CC para compor a solicitação do estágio CA.

$$p_{cc} = n_d p_{CaC} + (1-n_d) p_{Ar} \quad (6.35)$$

Adicionando a potência do estágio CA à equação (6.34), o equilíbrio de potência no link CC pode ser fornecido por (6.36) e em (6.37) com suas dinâmicas associadas.

$$P_{link_cc} = P_{cc} - P_{PAC} \quad (6.36)$$

Assim,

$$P_{link_cc} = n_d p_{CaC} + (1-n_d) p_{Ar} - P_{PAC} \quad (6.37)$$

Sendo que as potências envolvidas em cada estágio são calculadas conforme as equações (6.38) a (6.40).

$$P_{CaC} = i_{CaC} v_{CaC} \quad (6.38)$$

$$P_{Ar} = i_{Ar} v_{Ar} \quad (6.39)$$

$$p_{PAC} = \frac{3}{2} (i_{d_PAC} v_{d_PAC} + i_{q_PAC} v_{q_PAC}) \quad (6.40)$$

De forma a facilitar o entendimento da proposta apresentada, as variáveis utilizadas na modelagem podem ser observadas no diagrama simplificado da GD na Figura 6.8.

Figura 6.8: Variáveis da geração distribuída empregadas na modelagem.

Uma aproximação realizada no modelo, é representar o estágio CA por uma resistência R_0 . Tal consideração leva a potência no estágio CA a ser reescrita pela equação (6.41).

$$p_{PAC} = \frac{(v_{link_CC})^2}{R_0} \quad (6.41)$$

Assim, substituindo (6.41) em (6.37) e aplicando pequenos sinais na (6.42), encontra-se (6.43).

$$v_{link_CC} C_{cc} \frac{d}{dt} (v_{link_CC}) = n_d i_{CaC} v_{CaC} + (1 - n_d) i_{lAr} v_{Ar} - \frac{(v_{link_CC})^2}{R_0} \quad (6.42)$$

$$\begin{aligned}
& (V_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}) C_{cc} \frac{d}{dt} (V_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}) = \\
& n_d (V_{CaC} + \hat{v}_{CaC}) (I_{CaC} + \hat{i}_{CaC}) + (1 - n_d) (V_{Ar} + \hat{v}_{Ar}) (I_{lAr} + \hat{i}_{lAr}) - \\
& \frac{(V_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC})^2}{R_0}
\end{aligned} \tag{6.43}$$

Por conseguinte, ponderando em (6.44) que as multiplicações entre as variáveis para pequenos sinais são muito pequenas e que, da mesma forma, a sua derivada é pequena, obtém-se a equação para valores médios (6.45) e a equação (6.46), a qual é a representação do modelo desenvolvido para pequenos sinais.

$$\begin{aligned}
& (V_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}) C_{cc} \frac{d}{dt} (V_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}) = \\
& n_d (V_{CaC} + \hat{v}_{CaC}) (I_{CaC} + \hat{i}_{CaC}) + (1 - n_d) (V_{Ar} + \hat{v}_{Ar}) (I_{lAr} + \hat{i}_{lAr}) - \\
& \frac{V_{link_CC}^2 + 2V_{link_CC}\hat{v}_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}^2}{R_0}
\end{aligned} \tag{6.44}$$

$$0 = n_d (V_{CaC} I_{CaC}) + (1 - n_d) (V_{Ar} I_{lAr}) - \frac{V_{link_CC}^2}{R_0} \tag{6.45}$$

$$\begin{aligned}
& V_{link_CC} C_{cc} \frac{d}{dt} (\hat{v}_{link_CC}) = n_d (\hat{v}_{CaC} I_{CaC} + V_{CaC} \hat{i}_{CaC}) + \\
& (1 - n_d) (\hat{v}_{Ar} I_{lAr} + V_{Ar} \hat{i}_{lAr}) - \frac{2V_{link_CC} \hat{v}_{link_CC}}{R_0}
\end{aligned} \tag{6.46}$$

A partir da equação (6.46) e analisando apenas a variação da corrente de saída da CaC ($\hat{i}_{CaC}$) e da tensão no link CC ($\hat{v}_{link_CC}$), obtém-se a equação (6.47).

$$V_{link_CC} C_{cc} \frac{d}{dt} (\hat{v}_{link_CC}) = n_d (V_{CaC} \hat{i}_{CaC}) - \frac{2V_{link_CC} \hat{v}_{link_CC}}{R_0} \tag{6.47}$$

Aplicando Laplace em (6.47), chega-se em (6.49), a qual é a equação para pequenos sinais que relaciona a tensão do link CC com a parcela de corrente da CaC com uma dinâmica associada a variável n_d .

$$\hat{v}_{link_CC}(s) \left(V_{link_CC} C_{cc} s + \frac{2V_{link_CC}}{R_0} \right) = n_d (V_{CaC} \hat{i}_{CaC}) \quad (6.48)$$

$$\frac{\hat{v}_{link_CC}(s)}{\hat{i}_{CaC}(s)} = \frac{n_d R_0 V_{CaC}}{V_{link_CC} C_{cc} R_0 s + 2V_{link_CC}} \quad (6.49)$$

Já para o armazenador, igualmente partindo da equação (6.46) e considerando a variação em $\hat{i}_{lAr}$, encontra-se a equação (6.50).

$$V_{link_CC} C_{cc} \frac{d}{dt} (\hat{v}_{link_CC}) = (1 - n_d) (V_{Ar} \hat{i}_{lAr}) - \frac{2V_{link_CC} \hat{v}_{link_CC}}{R_0} \quad (6.50)$$

Assim, chega-se em (6.51), que define a equação para pequenos sinais que relaciona a tensão do link CC com a parcela solicitada de corrente do armazenador por meio de uma dinâmica específica.

$$\frac{\hat{v}_{link_CC}(s)}{\hat{i}_{lAr}(s)} = \frac{(1 - n_d) V_{Ar} R_0}{V_{link_CC} C_{cc} R_0 s + 2V_{link_CC}} \quad (6.51)$$

De forma a associar o gerenciamento à dinâmica da CaC, n_d é descrito na equação (6.52) como sendo a própria dinâmica da CaC, fornecida pelo coeficiente de tempo τ .

$$n_d(s) = \frac{1}{s\tau + 1} \quad (6.52)$$

Do mesmo modo, substituindo (6.52) nas equações (6.49) e (6.51) encontra-se (6.53) e (6.54), respectivamente.

$$\frac{\hat{v}_{link_CC}(s)}{\hat{i}_{CaC}(s)} = \frac{R_0 V_{CaC}}{\tau V_{link_CC} C_{cc} R_0 s^2 + (2\tau V_{link_CC} + V_{link_CC} C_{cc} R_0)s + 2V_{link_CC}} \quad (6.53)$$

$$\frac{\hat{v}_{link_CC}(s)}{\hat{i}_{lAr}(s)} = \frac{\tau V_{Ar} R_0 s}{\tau V_{link_CC} C_{cc} R_0 s^2 + (2\tau V_{link_CC} + V_{link_CC} C_{cc} R_0)s + 2V_{link_CC}} \quad (6.54)$$

Ambas as equações (6.53) e (6.54) representam a parcela de corrente solicitada à CaC e ao armazenador em pequenos sinais, as quais possuem dinâmicas complementares (uma lenta e a outra rápida) e que compõem a potência no estágio CC para suprir uma demanda do estágio CA.

Finalmente, a Figura 6.9 descreve o diagrama de controle para esta estratégia. Observa-se que o armazenador trabalha somente no transitório e não fornece energia em regime. Por sua vez, a CaC não opera nos transitórios com dinâmica rápida, porém não é possível controlar e/ou gerenciar o seu ponto de operação em regime para este cenário.

Figura 6.9: Malha de controle da tensão do link CC com a CaC e armazenador no estágio CC.

Através da Figura 6.9, fica evidente que a corrente de referência gerada pelo controlador do link CC é equivalente tanto para a CaC quanto para o armazenador (6.55), porém a referência de corrente para o armazenador em (6.56) é modificada pelo termo com dinâmica rápida $(1 - n_d(s))$ e a CaC pelo termo $n_d(s)$, o qual fornece a dinâmica lenta correspondente.

$$\dot{i}_{cc}^* = \dot{i}_{Ar}^* = \dot{i}_{CaC}^* \quad (6.55)$$

$$\dot{i}_{Ar}^{ref} = \dot{i}_{Ar}^* [1 - n_d(s)] \quad (6.56)$$

6.3 Gerenciamento da energia da CaC e do armazenador em regime

Além da estrutura específica para o transitório apresentada na seção anterior, é de interesse gerenciar e compartilhar a potência do estágio CC em regime permanente, uma vez que uma das limitações da estrutura de controle anterior é a sua impossibilidade de controlar o ponto de operação da CaC. Como descrito nos capítulos iniciais deste trabalho, o ponto de operação da CaC pode ser controlado pensando tanto em sua vida útil quanto em uma gestão mais adequada para venda de sua energia, por exemplo.

Deste modo, a estratégia proposta pode ser apresentada por meio da Figura 6.10. Na Figura 6.10 (a) é possível observar que, após uma solicitação em degrau proveniente do estágio CA, a qual é superior a energia que a CaC está ajustada para suprir em regime (controle do ponto de operação), o armazenador fornece o restante da energia demandada pela carga.

Tal cenário pode ocorrer tanto pela potência solicitada ultrapassar os limites nominais da CaC, quanto o seu ponto de operação (fornecimento de potência à carga) estar fixada em um valor abaixo do solicitado. Ressalta-se que para esta estratégia, as considerações realizadas acima são válidas também para um cenário em que o armazenador esteja absorvendo energia em regime permanente e seja solicitado que o mesmo forneça potência no transitório de carga.

A função denominada “compartilhamento de potência” modifica a referência de corrente do armazenador (6.57) ao ajustá-la com um ganho variável k_s , o qual pondera a etapa $k_s n_d(s)$. Ao multiplicar esta etapa por valores de k_s diferentes de um, o compartilhamento de potência defini valores instantâneos e em regime permanente diferentes de zero para a referência de corrente do armazenador, o que implica em o armazenador assumir tanto o transitório quanto as solicitações de potência em regime.

$$\dot{i}_{AR}^{ref} = \dot{i}_{AR}^* [1 - k_s n_d(s)] \quad (6.57)$$

O ganho k_s , representado em (6.58), é definido em função do erro da tensão do link CC (6.59) e do ganho k_{ps} . Dessa forma, a relação com o erro de tensão possibilita a função de compartilhamento entender se o armazenador deve injetar ou absorver potência e, até mesmo, não ser acionado, como é o caso para k_s igual a um. Por outro lado, o ganho k_{ps} fornece a velocidade com que os conversores que formam o estágio CC compartilharão a potência solicitada.

$$k_s = \frac{2}{1 + e^{k_{ps} \Delta v_{link_CC}}} \quad (6.58)$$

$$\Delta v_{link_CC} = v_{link_CC_ref} - v_{link_CC} \quad (6.59)$$

Portanto, o ganho k_s fornece a medida de energia necessária que o armazenador precisa para manter a tensão do link CC estável. Naturalmente, como observado na Figura 6.11, esta medida é relativa a referência de corrente do armazenador e está expressa nas equações (6.60) e (6.61). Já o ganho k_{ps} fornece a dinâmica com que o armazenador irá compartilhar a potência para manter a tensão do link CC regulada.

$$\dot{i}_{AR}^{ref} = \dot{i}_{AR}^* [1 - k_s n_d(s)] \quad (6.60)$$

$$\dot{i}_{AR}^{ref} = \dot{i}_{AR}^* \left[1 - \left(\frac{2}{1 + e^{k_{ps} \Delta v_{link_CC}}} \right) n_d(s) \right] \quad (6.61)$$

A Figura 6.12 ilustra o comportamento do compartilhamento de potência k_s para diversos valores de k_{ps} e diferentes erros de tensão do link CC. Observa-se que para erro nulo de tensão no link CC, o valor do ganho k_s é unitário, ou seja, não há solicitação de energia para o armazenador. Contudo, erros de tensão diferentes de zero podem gerar valores de k_s negativos, o que acarreta em uma solicitação para o armazenador injetar potência no link CC, ou o k_s positivo, que faz com que o armazenador absorva potência.

Além disso, a Figura 6.12 mostra que quanto maior for o valor do ganho k_{ps} , mais rápida será a dinâmica de compartilhamento. Ao mesmo tempo, valores mais elevados de k_{ps} implicam em um menor erro da tensão do link CC em regime permanente, pois quanto menor for o valor de k_{ps} , maior é o valor do erro da tensão para que se atinja o valor necessário do ganho k_s .

Figura 6.12: Comportamento do compartilhamento de potência com os ganhos k_s e k_{ps} associados ao erro de tensão.

Finalmente, para a estratégia proposta, a vantagem em compartilhar potência tanto no transitório quanto em regime permanente com uma dinâmica específica, implica em um erro de regime permanente na tensão do link CC quando o compartilhamento estiver ativo. Porém, com o ajuste do ganho k_{ps} , como sugere a Figura 6.12, é possível minimizar o erro da tensão do link CC. Resultados nas próximas seções elucidarão e sustentarão a estratégia introduzida acima, apresentando erros menores que 1,5%.

6.4 Análise dinâmica para a estratégia de gerenciamento

A estrutura de gerenciamento proposta com o conversor *interleaved* e o conversor bidirecional, ambos com modelos para pequenos sinais e associados à estratégia de compartilhamento é mostrada na Figura 6.13. Para a análise em frequência da Figura 6.13 foi utilizado o software MatLab[®].

A análise inicial é realizada com a linearização da função de compartilhamento de potência, sendo definidos valores fixos para o ganho k_s . Posteriormente, é ponderada a dinâmica da função e conduzida à análise para diferentes valores de k_{ps} . Para finalizar, é apresentado um estudo de sensibilidade paramétrica para variações do ponto de operação do armazenador de energia.

As análises dinâmicas que são apresentadas nesta seção são realizadas com os parâmetros trazidos na Tabela 6.2.

Figura 6.13: Malha de controle da tensão do link CC considerando as plantas de corrente da CaC e do armazenador com compartilhamento de potência.

A análise em frequência com a linearização da função compartilhamento de potência e variação do ganho k_s de 0,1 a 1,0 está representada na Figura 6.14. Observa-se que o ganho k_s não altera a largura de banda e, à medida que k_s é incrementado, ou seja, a solicitação de

potência ao armazenador for reduzida, surgem ressonâncias em torno de 2,1Hz (Figura 6.14 (b)).

Já o cenário no qual k_s é igual a um, equivalente a situação apresentada na Figura 6.11, o armazenador atua apenas no transitório com corrente média igual a zero. Avaliando o conversor bidirecional operando com corrente média igual a zero, implica que o ciclo de trabalho médio também deve ser igual a zero. Assim, a Figura 6.14 (c) traz a resposta em frequência para este cenário, o que mostra uma ressonância acentuada quando comparada com os resultados obtidos para valores menores de k_s .

Tabela 6.2: Parâmetros utilizados na análise em frequência.

Estágio	Parâmetro	Valor
	Tensão link CC	250 (V)
	Capacitância link CC	1360 μ (F)
	f_s	12 k (Hz)
	Dinâmica (τ)	200 m (s)
Armazenador	Tensão	100 (V)
	Capacidade	5 (Ah)
CaC	Tensão	28,8 (V)
	Corrente	35 (A)
Conversor bidirecional	R_{Ar}	50 m (Ω)
	C_{Ar}	940 μ (F)
	R_{cAr}	175 m (Ω)
	L_{Ar}	10 m (H)
	R_{lAr}	300 m (Ω)
	R_{cc}	175 m (Ω)
	k (ciclo de trabalho médio)	0,74
Conversor <i>interleaved</i>	L_1, L_2	870 μ (H)
	R_{l1}, R_{l2}	34,8 m (Ω)
	C_1, C_2	1 μ (F)
	R_{c1}, R_{c2}	29 m (Ω)
	R_{S1}, R_{S2}	24 m (Ω)
	k (ciclo de trabalho médio)	0,88

a

b

c

Figura 6.14: Resposta em frequência para diferentes valores de k_s (a), detalhe da ressonância (b) e resposta em frequência para $k_s = 1$ e ciclo de trabalho médio igual a zero (c).

A Figura 6.15 mostra o mapa de polos e zeros para valores de k_s entre 0,1 e 1,0 com incrementos de 0,1 no ganho. Na Figura 6.15 (a) é possível observar o movimento dos polos em baixa frequência ($\approx 2,1$ Hz), os quais geram a oscilação em baixa frequência. O aumento de k_s implica em um movimento dos polos no sentido do eixo imaginário, ainda que para toda faixa de operação a GD seja estável.

Já a Figura 6.15 (b) mostra a trajetória dos polos dominantes para a mesma variação e incremento de k_s . Nela é possível observar que à medida que k_s é incrementado, o fator de amortecimento tende a ser maior, o que implica em uma redução do sobressinal. Este efeito pode ser observado na resposta ao degrau da Figura 6.16 (a), cujo o aumento de k_s reduz o sobressinal da resposta ao degrau.

Figura 6.15: Mapa de polos e zeros para diferentes valores de k_s .

Figura 6.16: Resposta ao degrau para diferentes de k_s (a) e (b) detalhe do sobressinal do degrau.

Outro parâmetro importante da proposta de gerenciamento é a dinâmica que imprime o ganho k_{ps} . Assim, a Figura 6.17 ilustra a resposta em frequência para uma variação do ganho k_{ps} de 0,1 a 100,0. No mesmo sentido da resposta para a variação do ganho k_s , não há alteração substancial da largura de banda e, com a redução de k_{ps} , ou seja, com a redução da dinâmica de compartilhamento (aumento de k_s), surge a ressonância em 2,1 Hz.

Figura 6.17: Resposta em frequência para diferentes valores de k_{ps} .

A resposta ao degrau da Figura 6.18 (a) mostra o aumento do sobressinal com a elevação do k_{ps} , o que já é esperado uma vez que a dinâmica de compartilhamento se torna

mais rápida. Além disso, na Figura 6.18 (b) o aumento do ganho k_{ps} implica em uma redução do erro de regime da tensão do link CC. Tal efeito é esperado, já que a dinâmica de compartilhamento é elevada. Este efeito poderá ser confirmado em resultados experimentais discutidos nas próximas seções.

a

b

Figura 6.18: Resposta ao degrau para diferentes valores de k_{ps} (a) e (b) detalhe do erro em regime.

Não obstante, o mapa de polos e zeros para valores de k_{ps} entre 0,1 e 100,0 é ilustrado na Figura 6.19. O aumento de k_{ps} na Figura 6.19 (a) tem como efeito a trajetória dos polos dominantes no sentido do eixo imaginário e, por consequência, a redução do fator de amortecimento. Esse efeito é correlato com o resultado para a resposta ao degrau mostrada na Figura 6.18. Para os polos em baixa frequência mostrados na Figura 6.19 (b), a trajetória com o aumento de k_{ps} é no sentido de se afastar do eixo imaginário e também de aumentar o fator de amortecimento.

a

b

Figura 6.19: Mapa de polos e zeros para diferentes valores de k_{ps} .

Por fim, é realizada uma variação na tensão de entrada do armazenador fixando o ganho k_{ps} em dez. A resposta em frequência para uma variação de 50 V é exibida na Figura 6.20 (a), sendo possível observa uma redução da banda passante com a redução de tensão. Além disso, um atraso na resposta quando da redução da tensão é observado.

Figura 6.20: Resposta em frequência (a) e ao degrau (b) para diferentes valores de tensão de entrada do armazenador com $k_{ps} = 10$.

6.5 Resultados do gerenciamento da CaC e armazenador

Os resultados de simulação e experimentais foram extraídos com a configuração ilustrada pela Figura 6.21. As manobras de carga efetuadas foram realizadas no PAC com a GD operando no modo ilhado. Os parâmetros apresentados na Tabela 6.2 foram igualmente empregados em simulação e no protótipo construído.

A apresentação dos resultados é realizada com a inicialização da GD em rampa no controle da tensão do link CC e com carga linear no PAC. A estrutura de controle empregada é aquela ilustrada na Figura 6.13. Salienta-se que para este resultados a carga no PAC não ultrapassa a potência nominal da CaC. A Figura 6.22 ilustra a inicialização da GD com os sinais do estágio CC.

Figura 6.21: GD com compartilhamento de potência simulado e testado experimentalmente.

Figura 6.22: Escala vertical: inicialização da GD. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (10 A/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Após a GD e CaC alcançarem o regime permanente, é realizada uma manobra de carga em degrau de 250 W para 550 W no PAC. Como a carga não ultrapassa a capacidade da CaC, o armazenador atua apenas no transitório e zera a injeção ou absorção de corrente em regime permanente. Por sua vez, não há dinâmica de alta frequência na CaC e a mesma é que

fornece energia em regime permanente para a carga. A Figura 6.23 ilustra o descrito acima, sendo que o resultado de simulação análogo ao experimental é demonstrado na Figura 6.24.

Figura 6.23: Escala vertical: degrau de carga no PAC. Vermelho: tensão de entrada do armazenador (20 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (10 A/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Figura 6.24: Degrau de carga no PAC (simulação).

Já na Figura 6.25 e Figura 6.26 são apresentados em detalhes os sinais do armazenador e da CaC, respectivamente. Como é empregada uma bateria do tipo Li-Po (lítio polímero) de alta densidade de energia como armazenador, o afundamento na tensão de entrada é reduzido com variação de 1%. Por sua vez, a alta frequência presente no sinal de corrente do armazenador (Figura 6.25 (b)) se justifica, justamente, pela sua referência gerenciar a alta frequência na estratégia de gerenciamento.

Figura 6.25: Escala vertical: detalhe da tensão e corrente do armazenador com o degrau de carga no PAC. Vermelho: tensão de entrada do armazenador (2 V/div). Laranja: corrente do armazenador (2,5 A/div). Escala horizontal: 1 s/div.

Figura 6.26: Escala vertical: detalhe da tensão e corrente da CaC com o degrau de carga no PAC. Azul: tensão da CaC (1 V/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (5 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

O equilíbrio de potência é exposto na Figura 6.27. O somatório das potências da CaC e do armazenador em azul reflete o degrau de carga solicitado pelo estágio CA. Por meio deste resultado, pode-se garantir que as dinâmicas da CaC e do armazenador são complementares, o que implica em um equilíbrio entre o estágio CC e CA como projetado. Na Figura 6.28 é mostrado o resultado de simulação para corroborar a estratégia proposta.

Figura 6.27: Escala vertical: somatório das potências do estágio CC, do armazenador e CaC. Azul escuro: somatório das potências total do estágio CC (300 W/div). Laranja: potência do armazenador (300 W/div). Roxo: potência da CaC (300 W/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Figura 6.28: Equilíbrio de potências do estágio CC (azul escuro), do armazenador (laranja) e da CaC (roxo) (simulação).

Como referência, são medidas a corrente total do link CC (roxo) e a potência disponibilizada no link CC (verde). A Figura 6.29 ilustra este resultado.

Figura 6.29: Escala vertical: efeito no link CC. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Verde: potência no link CC (300 W/div). Roxo: corrente no link CC (2 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

A variação de tensão no link CC está representada na Figura 6.30. Na entrada de carga o erro de tensão é de 2,8% (7 V), sendo que na retirada de carga o erro é de 2% (5 V). Diferenças nos resultados estão associadas à variação de carga e, consequentemente diferentes valores de resistências na saída dos conversores, o que implica em comportamentos dinâmicos diferentes.

Para o resultado de simulação mostrado na Figura 6.31, o comportamento segue similar ao resultado experimental, porém o erro de tensão na entrada é de 1,4% (3,5 V), sendo que na retirada de carga passa a ser de 0,88% (2,2 V).

Figura 6.30: Escala vertical: detalhe na tensão do link CC. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 1 s/div.

Figura 6.33: Escala vertical: detalhe do degrau no estágio CA. Azul: tensão da fase “a” da GD (25 V/div). Pink: corrente da fase “a” da GD (1 A/div). Escala horizontal: 40 ms/div.

Ao contrário dos resultados anteriores, a Figura 6.34 mostra o resultado para o compartilhamento de potência no transitório e em regime. Neste cenário, o ponto de operação da CaC foi ajustado para operar a 50% da sua potência nominal.

Assim, conforme a Figura 6.34, em um primeiro degrau a CaC fornece energia até seu valor máximo de potência. Já em um segundo momento, é solicitado uma maior quantidade de potência em degrau no PAC e, como a CaC já está no seu valor máximo, o armazenador assumi o restante da potência faltante. Para este resultado, foi utilizado um ganho $k_{ps} = 10$. Com as mesmas manobras de carga, a Figura 6.35 exhibe o resultado de simulação para este cenário.

Figura 6.34: Escala vertical: compartilhamento em regime para $k_{ps} = 10$. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (5 A/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Figura 6.35: Corrente da CaC e do armazenador com compartilhamento em regime para $k_{ps} = 10$ (simulação).

Semelhante ao resultado da Figura 6.34, o ponto de operação da CaC é posicionado em um valor intermediário, ao passo que em um segundo degrau, a energia da CaC é elevada a um ponto e, após isso, o armazenador supri o restante de potência em regime.

Figura 6.36: Escala vertical: compartilhamento em regime para $k_{ps} = 10$. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (5 A/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Em relação à estratégia adotada, nos dois momentos em que não houve solicitação de potência em regime ao armazenador, a tensão do link CC apresentou erro de tensão apenas no

transitório. Tais erros são de 2,4% (6 V) na entrada de carga e 1,2% (3 V) na saída conforme mostra o resultado da Figura 6.37.

Ainda na Figura 6.37, quando da injeção de energia em regime por parte do armazenador, o erro da tensão é de 2% (5 V). Conforme a estratégia apresentada, este é o valor de erro em regime para gerar um valor de k_s que atenda a demanda de potência que a CaC não supri e que é solicitada pelo estágio CA. Para este resultado, foi utilizado um ganho $k_{ps} = 10$. Para o mesmo cenário em simulação, o erro de tensão em regime é de 1,88% (4,7 V), conforme ilustra a Figura 6.38.

Contudo, conforme a Figura 6.39 (a), diminuindo o ganho de k_{ps} para 5, a dinâmica de compartilhamento fica mais lenta e o erro de regime aumenta para 3,4% (8,5 V). Por outro lado, aumentando o ganho k_{ps} para 20 (Figura 6.39 (b)), o erro diminui para 1,4% (3,5 V). Com base nestes resultados, fica evidente o impacto causado pelo aumento do ganho k_{ps} no sentido de reduzir o erro em regime da tensão.

Figura 6.37: Escala vertical: detalhe da tensão do link CC com compartilhamento em regime para $k_{ps} = 10$. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Figura 6.38: Tensão do link CC com compartilhamento em regime para $k_{ps} = 10$ (simulação).

Figura 6.39: Escala vertical: detalhe da tensão do link CC com compartilhamento em regime (a) para $k_{ps} = 5$ e (b) para $k_{ps} = 20$. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Por outro lado, para um cenário em que seja necessário carregar o armazenador, procura-se demonstrar que a estratégia proposta opera de forma semelhante àquela discutida na Figura 6.23 e Figura 6.34 quando a corrente média do armazenador é zero.

Para o cenário em que o armazenador absorva energia em regime conforme ilustra a Figura 6.40 e havendo uma solicitação de carga do estágio CA, o gerenciamento proposto é capaz de fornecer energia com dinâmica lenta para a CaC e rápida para o armazenador. A Figura 6.41 descreve a entrada e saída de carga com o armazenador absorvendo energia, sendo que a Figura 6.42 apresenta o balanço de energia do estágio CC.

Figura 6.40: Escala vertical: inversão da corrente no armazenador. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (5 A/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Figura 6.41: Escala vertical: degrau de carga com inversão da corrente no armazenador. Vermelho: tensão do de entrada do armazenador (20 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (5 A/div). Amarelo: corrente total do conversor da CaC (10 A/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Figura 6.42: Escala vertical: somatório das potências do estágio CC, do armazenador e da CaC. Vermelho: somatório das potências total do estágio CC (300 W/div). Laranja: potência do armazenador (300 W/div). Roxo: potência da CaC (300 W/div). Escala horizontal: 2 s/div.

Por fim, a análise dos resultados deste capítulo, quando comparados aos resultados tanto do capítulo 4 quanto do 5, indicam a eliminação da oscilação presente nos sinais da CaC e uma gestão tanto no transitório quanto em regime para a energia da célula.

Considerando que esta proposta pode ser empregada para sistemas conectados à rede de distribuição, pode ser observado que a malha da tensão do link CC não precisará ser inserida em cascata com a corrente da GD, o que implica em uma melhoria quando se compara com aquela estrutura do capítulo 5.

Como desvantagem da estratégia, é observado que há erro na tensão do link CC quando solicita-se potência em regime ao armazenador. Contudo, com a parametrização adequada de k_{ps} o erro pode ser reduzido a menos de 1,5%.

6.6 Considerações finais do capítulo 6

Este capítulo expôs a proposta de gerenciamento para o estágio CC com foco central na célula a combustível. O tema fundamental gravitou na busca de uma estratégia que fornecesse potência solicitada pelo estágio CA com dinâmicas distintas para a CaC e para o armazenador.

Desta forma, o modelo desenvolvido levou em consideração a parcela de potência de cada elemento e àquela solicitada pelo estágio CA. Por meio da estratégia de

compartilhamento desenvolvida, foi possível compartilhar a potência tanto no transitório quanto em regime permanente. Além disso, através dos parâmetros da estratégia de compartilhamento, é possível definir o valor desejável de erro em regime e ajustar a sua dinâmica de atuação.

A dinâmica imposta pela estrutura proposta está alinhada com a proteção da célula a combustível, uma vez que transitórios não são solicitados à CaC e fenômenos associado a falta de combustível (*fuel starvation*) são evitados.

Ainda que exista erro de regime para a estratégia proposta, este pode ser ajustado por parâmetros desenvolvidos no próprio controle e reduzido a menos de 1,5% como demonstrado em resultados experimentais.

Capítulo 7

Inicialização da CaC

Nos capítulos anteriores, a preocupação residiu em verificar e avaliar soluções para as operações da GD no modo ilhado e conectado, tendo como fonte principal a CaC. De forma a analisar a operação na sua integralidade, a etapa de inicialização da CaC, que usualmente inicia com baixos níveis de tensão e corrente em relação ao seu valor nominal, tem demandado atenção de pesquisadores como nos trabalhos [59-61].

Tal atenção na etapa de inicialização ocorre, principalmente, porque as condições ótimas de operação para uma célula a combustível estão ligadas, predominantemente, a hidratação da membrana, temperatura de operação e pressão de entrada dos gases. Como o comportamento destas variáveis se caracteriza por dinâmicas lentas (na ordem de minutos), comumente são encontradas estratégias que catalisam a etapa de inicialização da CaC.

Em muitos trabalhos, no sentido de posicionar a CaC no seu ponto de operação ótimo o mais rápido possível, os gases de entrada são preaquecidos. Além disso, em caso de inoperância da célula por um período maior que quatro semanas, a injeção de água duplamente deionizada, com o objetivo de hidratar a membrana polimérica, é usualmente empregada antes da sua inicialização conforme [62].

Do exposto acima, este capítulo tem como objetivo desenvolver uma estratégia de inicialização para a CaC, a qual seja capaz de levar a célula a operar em seu ponto ótimo de forma mais rápida. Além disso, estimar as variáveis que mais impactam no desempenho da CaC na sua etapa de inicialização está no escopo deste capítulo.

Ressalta-se que a descrição para o ponto ótimo de operação da CaC, é aquele no qual a tensão de 28,8 V forneça uma corrente de 35 A e produza 1 kW de potência. Como já descrito anteriormente neste trabalho, na sua etapa de inicialização, devido a temperatura e umidade, estes valores não são alcançados.

Para a célula utilizada no protótipo, chegou-se a obter para um valor de 28,8 V uma corrente de 17 A, ou seja, uma potência de 50% da sua capacidade nominal. Este fato inclusive já foi relatado em [62].

Deste modo, o capítulo é iniciado com um estudo agregando variáveis como pressão, temperatura e resistência ôhmica da CaC com o conversor de potência. Posteriormente, uma estratégia de gerenciamento para a CaC na sua etapa de inicialização é apresentada. Por fim, a análise em frequência e resultados de simulações e experimentais são discutidos para sustentarem a proposta.

7.1 Impacto das variáveis da CaC na tensão produzida pelo conversor

Correlacionar as variáveis da CaC que possuem dinâmica lenta no processo de inicialização com a tensão de saída do conversor, é o caminho para se entender qual variável possui maior impacto na tensão produzida pelo conversor.

Com base nesta análise, é possível associar conversor e célula, criando uma estratégia de gerenciamento com o conversor para posicionar a CaC em seu ponto de operação ótimo de forma mais rápida.

Assim, a análise é conduzida com base no modelo da tensão da CaC discutido no capítulo 2 e no próprio modelo do conversor apresentado no capítulo 3 deste trabalho. Além disso, é preciso ponderar a diferença existente entre a dinâmica da célula e do conversor, observando que a análise das variáveis da CaC se dará na sua inicialização, enquanto a do conversor em regime.

Desta forma, com a CaC na etapa de inicialização e com o conversor operando em regime, o ganho de tensão do conversor empregado para processar a energia da CaC pode ser dado através do modelo em espaço de estado para valores médios expresso por (7.1), conforme descrito em [63, 64].

$$G_{conv}(s) = C_v (sI - A)^{-1} B \quad (7.1)$$

Aplicando o teorema do valor final na equação (7.1) e observando que o valor em regime permanente de (7.1) é obtido fazendo o limite de frequência tender a zero multiplicado pela própria frequência, chega-se a (7.2).

$$\frac{v_{link_CC}}{v_{CaC}} = \lim_{s \rightarrow 0} s \left[C_v (sI - A)^{-1} B \right] \frac{1}{s} = -C_v A^{-1} B \quad (7.2)$$

Trazendo novamente a tensão da célula v_{CaC} em (7.3), chega-se na equação (7.4).

$$v_{CaC} = E_{Nernst} - v_{at} - v_{ohmico} - v_{trans} \quad (7.3)$$

$$v_{link_CC} = (-C_v A^{-1} B) v_{CaC} \quad (7.4)$$

Além disso, acrescentando, no comportamento da corrente de troca da célula, a influencia da temperatura e pressão de entrada por meio da equação (7.5) [65, 66], pode-se traçar enfim a influência das variáveis de interesse da CaC na tensão do conversor.

$$i_0 = \frac{zFk(P_{H_2} + P_{O_2})}{Rh} e^{\frac{-\Delta G}{RT}} \quad (7.5)$$

Considerando que:

z : elétrons por molécula de hidrogênio;

F : constate de Faraday, equivalente a carga em um mol de elétrons (C/mol);

k : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K);

R : constante universal dos gases (J/molK);

h : constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Js);

ΔG : mudança na energia livre de Gibbs de formação (J);

T : temperatura de operação da CaC (K);

P_{H_2} : pressão parcial de hidrogênio no ânodo (atm);

P_{O_2} : pressão parcial de oxigênio no cátodo (atm).

Assim, por meio da equação (7.4) a Figura 7.1 ilustra a variação de tensão de saída do conversor para uma variação de 0,2 bar até 0,8 bar de pressão de hidrogênio. Para a CaC empregada experimentalmente, o fabricante sugere que a pressão seja ajustada entre 0,45 bar até 0,55 bar. Naturalmente, uma extrapolação desses valores é aplicada para verificar casos extremos de variações de pressão na célula.

Com base no resultado da Figura 7.1, é possível concluir que a variação de pressão de combustível na CaC não impacta a tensão produzida pelo conversor e, que esforços no sentido de controlar a pressão não implicam em ganhos substanciais. Como referência, a máxima tensão do conversor para pressão de 0,45 bar é de 759 V. Com o mesmo cenário, porém elevando a pressão para 0,55 bar, a tensão do link CC passa para 762 V, ou seja, um ganho de 0,39% .

Figura 7.1: Tensão de saída do conversor em função da pressão de hidrogênio e do ciclo de trabalho médio.

Por outro lado, a Figura 7.2 mostra a variação de tensão de saída do conversor para uma variação de resistência ôhmica da CaC. A resistência ôhmica da membrana está diretamente associada a sua hidratação, o que significa que um ressecamento da membrana está relacionado a um aumento da sua resistência [18, 67].

No trabalho [67] foi realizado um estudo da condutividade de uma membrana trocadora de prótons em função do seu grau de hidratação. Neste trabalho, foi desenvolvido um estudo comparativo entre uma membrana seca e uma hidratada (24 horas imersa em água deionizada), sendo observado uma condutividade na ordem de 10^{-7} Scm^{-1} para a membrana seca e 10^{-2} Scm^{-1} para a membrana hidratada.

Em termos práticos, a falta de hidratação em uma membrana ocorre, predominantemente, quando da sua inoperância por um longo intervalo de tempo e, não por acaso, é sugerido a injeção de água deionizada na entrada da CaC para umidificar a membrana e reduzir a sua resistência [62].

Em termos do ganho de tensão de saída, para uma resistência de $1 \text{ m } \Omega$ a tensão alcançada é de 791 V. Com o mesmo cenário, porém elevando a resistência para $3 \text{ m } \Omega$, a tensão é reduzida para 699 V, ou seja, um ganho de 11,6%. Ainda que seja observado um ganho elevado na tensão de saída do conversor, principalmente pelo impacto que a hidratação exerce na membrana polimérica, com o conversor eletrônico não é possível exercer um controle sobre a resistência ôhmica da membrana.

Figura 7.2: Tensão de saída do conversor em função da resistência ôhmica e do ciclo de trabalho médio.

Outra variável analisada é a temperatura da CaC. A Figura 7.3 delineia a variação de tensão de saída do conversor para uma variação de temperatura da CaC.

Considerando que a CaC seja iniciada em temperatura ambiente (24°C), a tensão de saída máxima para o conversor utilizado é de 637 V. Ao contrário, com a temperatura da CaC em seu valor máximo permitido (65°C), a tensão atinge o valor de 797 V, o qual representa um ganho de 20,11% na tensão em relação a temperatura ambiente.

Ainda que não considerado no modelo acima, o aumento de temperatura pode elevar a hidratação da membrana, o que causa a redução da resistência ôhmica da mesma. Este efeito em cascata pode causar um maior aumento na tensão de saída quando comparado com os valores apresentados.

Figura 7.3: Tensão de saída do conversor em função da temperatura de operação da CaC e do ciclo de trabalho médio.

Desta forma, com ganho substancial de tensão, a gestão da temperatura em uma CaC do tipo PEM gera interesse. Neste contexto, o desafio reside em como fazer a CaC operar em um ponto de operação associado a temperatura mais adequado em um curto intervalo de tempo quando da sua inicialização.

Assim sendo, as próximas seções deste capítulo apresentam uma proposta de gerenciamento para a temperatura da CaC, a qual é realizada utilizando o conversor da própria célula e armazenadores de energia.

7.2 Curto-circuito nos terminais de saída da CaC

Conforme observado anteriormente, a temperatura da CaC é a variável com maior impacto na tensão do conversor e, como já conhecido, é na inicialização da célula que a temperatura se encontra abaixo do seu valor ótimo para a operação da CaC.

A inicialização da célula em baixas temperaturas é um tema já amplamente conhecido e pesquisado na literatura [60, 68], sendo conhecida como *cold start* ou inicialização a frio. Nestes trabalhos, de forma geral, emprega-se a CaC como fonte auxiliar, sendo que na sua inicialização existem outras fontes que fornecem a potência ao estágio CC enquanto a CaC é aquecida. Por consequência disso, a inicialização em etapas por rampa é uma das mais comuns e empregadas para a célula [59, 61].

Por outro lado, observando que neste trabalho a CaC é a fonte principal e que o emprego de etapas em rampa não é uma possibilidade viável, uma vez que não há outra fonte para auxiliar em regime a sua operação, emprega-se a técnica de curtos-circuitos cíclicos nos terminais da pilha. O objetivo com a utilização desta técnica é acelerar a elevação da temperatura da CaC na etapa de inicialização.

Esta técnica tem como objetivo reduzir o período de preaquecimento da célula a combustível. Além disso, como descrito em [69, 70], é possível utilizá-la para controlar a resistência ôhmica da membrana e, com isso, restaurar a tensão da pilha devido à baixa umidade. Assim, além de elevar a temperatura da CaC na sua inicialização, a técnica de curtos-circuitos cíclicos pode produzir água e aumentar a umidade da membrana e diminuir a sua resistência ôhmica.

Embora acelere o processo de aquecimento da CaC, o emprego desta técnica produz uma redução instantânea na tensão de saída da célula quando acionada. Dependendo do arranjo e quantidade de chaves, a redução na tensão pode ser minimizada, porém para o cenário deste trabalho em que apenas uma chave é empregada, a tensão da CaC, necessariamente, é levada a zero nos seus terminais.

Desta forma, o desafio desta técnica em um sistema de GD, possuindo somente a CaC como fonte principal, se concentra em manter a tensão do link CC estável com a ocorrência de curtos-circuitos cíclicos para catalisar a elevação de temperatura da CaC. Além disso, ainda que exista um armazenador operando em paralelo com a CaC, neste cenário não é esperado que o armazenador forneça potência em regime, mas sim opere absorvendo os transitórios provenientes da técnica de curtos-circuitos cíclicos.

O cenário descrito acima pode ser considerado o pior para empregá-la, uma vez que há (apenas) uma chave e, quando ela é acionada, a tensão da CaC vai a zero. Caso seja usado um maior número de chaves, pode-se utilizar a técnica em um menor número de células em períodos diferentes, o que minimizaria o impacto na tensão de saída da CaC e facilitaria o seu uso. Contudo, o aumento do número de chaves deve ser seguido de um maior custo de operação da técnica.

Desta forma, pode-se considerar que a estratégia apresentada para a utilização da técnica com apenas uma chave servirá, igualmente, para utilizá-la com um maior número de chaves.

Um dado apresentado anteriormente que justifica a utilização da técnica é que, da temperatura ambiente até 65°C , pode-se obter um ganho de 20,11% na tensão de saída da CaC. Entretanto, uma discussão relevante para o seu emprego é o tempo no qual a CaC levaria para atingir a temperatura ótima de operação.

Contudo, para se estabelecer o tempo de aquecimento da CaC, é preciso situar as condições iniciais da célula. Por exemplo, em [42] é reportado que uma célula do tipo PEM de 4,2 kW leva 15 minutos para atingir a sua temperatura ótima de operação. As condições iniciais não foram apresentadas no trabalho.

Por outro lado, a célula empregada neste trabalho, dependendo das suas condições iniciais, leva até 12 horas para atingir seus valores nominais [62]. Obviamente, neste período outras variáveis como umidade e resistência ôhmica da membrana também impactam. Além disso, medir e fixar variáveis como umidade e resistência ôhmica da membrana não são fáceis e demandariam ferramentas não disponíveis em laboratório.

Com a discussão acima, deseja-se mostrar que apresentar um tempo para aquecimento da célula poderia conter uma quantidade de incertezas elevada. Desta forma, as próximas seções se concentrarão em viabilizar a aplicação da técnica de curtos-circuitos cíclicos na célula, observando que o tempo para o alcance da temperatura nominal dependerá das condições trazidas na discussão anterior.

7.3 Estratégia de gerenciamento para a inicialização da célula

Diferentemente do modelo apresentado no capítulo 6 no qual foi inserido uma dinâmica lenta no controle da CaC, aqui a dinâmica do curto-circuito nos terminais da célula sugere uma estrutura diferente daquela discutida.

Para iniciar a apresentação do modelo, as variáveis empregadas na modelagem são exibidas no diagrama simplificado da Figura 7.4. Sendo R_0 a ilustração da carga no link CC.

Figura 7.4: Variáveis da geração distribuída empregadas na modelagem proposta.

Com base na Figura 7.4, observa-se que a corrente i_0 pode ser expressa por (7.6).

$$i_0 = i_{CaC_link} + i_{Ar_link} \quad (7.6)$$

E, consequentemente, a potência no estágio CC fornecido por (7.7).

$$P_{cc} = v_{link_CC} i_0 \quad (7.7)$$

Observando o equilíbrio de potência no link CC por meio da equação (7.8), tem-se (7.9).

$$P_{link_cc} = P_{cc} - P_{R_0} \quad (7.8)$$

$$v_{link_CC} C_{cc} \frac{d}{dt} (v_{link_CC}) = v_{link_CC} i_0 - \frac{(v_{link_CC})^2}{R_0} \quad (7.9)$$

Aplicando pequenos sinais em (7.9) e rearranjando a equação (7.10), tem-se (7.11).

$$\begin{aligned} (V_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}) C_{cc} \frac{d}{dt} (V_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}) &= (V_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}) (I_0 + \hat{i}_0) - \\ &\frac{V_{link_CC}^2 + 2V_{link_CC} \hat{v}_{link_CC} + \hat{v}_{link_CC}^2}{R_0} \end{aligned} \quad (7.10)$$

$$V_{link_CC} C_{cc} \frac{d}{dt} \hat{v}_{link_CC} = V_{link_CC} \hat{i}_0 + \hat{v}_{link_CC} I_0 - \frac{2V_{link_CC} \hat{v}_{link_CC}}{R_0} \quad (7.11)$$

Considerando que o somatório das correntes médias de saída dos conversores da CaC e do armazenador podem ser reescritas na forma $I_0 = V_{link_CC} / R_0$, é empregar a transformada de Laplace na expressão (7.11) para obter (7.12), que relaciona a função de transferência das correntes de saída dos conversores da CaC e do armazenador com a tensão do link CC para pequenos sinais.

$$\frac{\hat{v}_{link_CC}(s)}{\hat{i}_0(s)} = \frac{R_0}{(R_0 C_{cc} s + 1)} \quad (7.12)$$

Assim sendo, a Figura 7.5 descreve o diagrama de controle para a estratégia de inicialização da CaC com curtos nos seus terminais. Destaca-se que o armazenador atua com a variação que ocorre na tensão do link CC, que por sua vez é afetada pelo curto-circuito que ocorre nos terminais da CaC. Os blocos m_{cac} e m_b referem-se aos ganhos estáticos dos conversores da CaC e dos armazenadores, respectivamente.

Figura 7.5: Malha de controle da tensão do link CC considerando a inicialização da CaC com curto-circuito nos seus terminais.

Especificamente, a função “ganho escalonado” ilustrada pela Figura 7.5 e representada pela equação (7.13) gera a referência de corrente ao armazenador conforme (7.14) e (7.15). O comportamento do ganho escalonado é refletido pela variação da tensão do link CC, conforme a ocorrência dos curtos-circuitos nos terminais da célula.

A dinâmica do ganho escalonado é ajustada pelo ganho k_{ts} e, conforme a Figura 7.6, à medida que seu valor aumenta, o ganho escalonado é incrementado ou decrementado com maior velocidade.

$$k_t = \frac{2}{1 + e^{-k_{ts}\Delta v_{link_CC}}} - 1 \quad (7.13)$$

$$\dot{i}_{AR}^{ref} = k_t \dot{i}_{AR}^* \quad (7.14)$$

$$\dot{i}_{AR}^{ref} = \dot{i}_{AR}^* \left(\frac{2}{1 + e^{-k_{ts}\Delta v_{link_CC}}} - 1 \right) \quad (7.15)$$

Na inicialização da CaC não se deseja solicitar energia do armazenador em regime, apenas a parcela para suprir os transitórios gerados pelo curto-circuito. Assim, ainda que a CaC esteja em seu processo de inicialização, mas com a tensão do link CC em equilíbrio (erro igual a zero), a função ganho escalonado gera um ganho k_t nulo e zera a corrente solicitada ao armazenador.

Porém, considerando a ocorrência do curto-circuito nos terminais da CaC, a função ganho escalonado gera ganhos k_t diferentes de zero para manter a tensão do link CC estável. O valor do ganho k_t é proporcional ao valor do erro da tensão durante o curto-circuito e ao próprio ganho k_{ts} . Portanto, a dinâmica de compensação da tensão do link CC pode ser ajustada com base no valor do ganho k_{ts} .

Figura 7.6: Comportamento do ganho escalonado em relação ao ganhos k_t e k_{ts} com o erro de tensão.

Para a análise em frequência foi considerado os limites extremos de operação com o ganho k_t variando entre 0,0 e 2,0. Conforme mostra a Figura 7.7, o aumento do ganho escalonado implica em um aumento da banda passante, enquanto na Figura 7.8 observa-se um atraso para uma redução do ganho k_t .

Figura 7.7: Resposta em frequência em malha fechada para diferentes valores de k_t .

Figura 7.8: Resposta ao degrau para diferentes valores de k_t .

7.4 Resultados do gerenciamento com curto-circuito nos terminais da CaC

A configuração do estágio CC com a técnica de curtos-circuitos cíclicos na entrada da CaC é testada em simulação e experimentalmente como ilustra a Figura 7.9. Nesta ilustração, estão representadas a disposição dos conversores e a estratégia de gerenciamento para a inicialização da CaC. Para os testes realizados, o estágio CA foi representado por uma carga R_0 posicionada no link CC.

Os curtos-circuitos nos terminais da CaC são programados para ocorrerem a cada 10 s com duração de 150 ms. Sendo que as análises são realizadas com os mesmos parâmetros trazidos na Tabela 6.2 apresentada no capítulo anterior.

A apresentação dos resultados é iniciada com o resultado da Figura 7.10. Nesse resultado, a CaC está operando com a ocorrência dos curtos-circuitos em seus terminais e o armazenador, por meio da função ganho escalonado, é acionado e mantém a tensão do link CC regulada em 250 V.

Figura 7.9: Estrutura do estágio CC testada para o gerenciamento com curto-circuito nos terminais da CaC.

Para as mesmas condições anteriores, a Figura 7.11 apresenta a análise em simulação. Reforça-se que o modelo desenvolvido para a CaC em linguagem C utilizando o software PSIM[®], possui como saída uma fonte de tensão controlada, o que limita por vezes, a comparação com os resultados experimentais.

Nestes resultados, a CaC opera como fonte principal no estágio CC e considera-se que está na sua etapa de inicialização. Para os resultados experimentais, a carga mantida pela CaC no link CC durante esta etapa é de 450 W.

A corrente de curto-circuito é medida na entrada dos dois indutores do conversor da CaC, portanto, quando ocorre o curto-circuito nos terminais da célula a corrente vai a zero. Tal fato está ligado ao limite de medição da ponteira isolada de corrente existente em laboratório.

Em detalhes, a Figura 7.12 mostra o comportamento da tensão e corrente da CaC durante o acontecimento do curto. A ocorrência da técnica é automática por meio de uma chave semicondutora em paralelo com a célula, sendo que com a abertura da chave há um sobressinal nos sinais de tensão e corrente. Como a tensão de entrada da CaC não é controlada e a corrente está em cascata com configuração dada pela planta da Figura 7.9, a dinâmica lenta do controle da tensão do link CC não permite uma resposta rápida o suficiente para

minimizar tal impacto. Contudo, conforme a Figura 7.12 (a), o armazenador absorve parte do sobressinal da corrente da CaC e reduz este impacto na tensão do link CC. Para efeito de comparação, os resultados obtidos em simulação estão presentes na Figura 7.13.

a

b

c

Figura 7.12: Escala vertical: detalhe do gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$. Verde: tensão do link CC (50 V/div). Azul: tensão da CaC (5 V/div). Laranja: corrente do armazenador (5 A/div). Amarelo: corrente da fase “a” do conversor da CaC (10 A/div) (a) e (5 A/div) (b). Escala horizontal: 500 ms/div.

a

b

c

Figura 7.13: Gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$. Verde: tensão do link CC (dividida por 5), Azul: tensão da CaC, Laranja: corrente do armazenador e Amarelo: corrente total do conversor da CaC (simulação).

A tensão do link CC para um ganho $k_{ts} = 10$ é exibido na Figura 7.14 e em detalhes na Figura 7.15. Conforme mostra a Figura 7.15, quando da ocorrência do curto, o erro da tensão é de 4,4% (11 V) durante a entrada do curto e de 3,2% (8 V) na retirada do curto. De acordo com a estratégia proposta, este é o valor de erro proporcional ao valor do ganho k_{ts} .

Figura 7.14: Escala vertical: tensão no link CC no gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div.

Figura 7.15: Escala vertical: detalhe da tensão no link CC no gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 250 ms/div.

Para o resultado de simulação da Figura 7.16, com as mesmas condições anteriores, o erro da tensão é de 2,6% (6,5 V) durante a entrada do curto e de 1,2% (3 V) na retirada do curto. Com comportamento idêntico ao do resultado experimental, o resultado de simulação apresenta um erro menor, o que está associado limitações do modelo utilizado para a CaC.

Figura 7.16: Tensão no link CC (dividida por 5) no gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 10$ (simulação).

Ao contrário, elevando o ganho k_{ts} para 30 o erro da tensão é reduzido para 2,4% (6 V) durante o curto e para 1,2% (3 V) na retirada. Este comportamento demonstra a dinâmica que o ganho k_{ts} fornece a estratégia proposta. O discutido acima está ilustrado na Figura 7.17 e em detalhes na Figura 7.18.

Figura 7.17: Escala vertical: tensão no link CC no gerenciamento com curto-circuito na entrada da CaC para $k_{ts} = 30$. Verde: tensão do link CC (5 V/div). Escala horizontal: 5 s/div.

Neste capítulo foi apresentado o impacto das variáveis da célula sobre a tensão de saída do conversor, observando que da temperatura ambiente (24°C) até 65°C pode-se obter um ganho de 20,11% na tensão de saída da CaC.

A estratégia de controle foi discutida e os resultados experimentais mostraram que o aumento do ganho k_{ts} reduz o erro de tensão a 2,4% quando do acionamento da técnica.

Capítulo 8

Conclusões

Dentro do contexto relativo à utilização de CaCs em GD, este trabalho apresentou a estruturação de uma GD para o fornecimento de energia baseado em CaC. De forma geral, a CaC e os estágios CC e CA foram introduzidos no decorrer do trabalho.

Já em relação a CaC, o princípio de funcionamento e modelagem da célula foram discutidos, sendo introduzido o modelo desenvolvido em simulação com resultados para a curva de polarização e para a de potência. Um dos principais desafios encontrados na utilização da CaC foi a definição de uma curva de polarização experimental que se aproximasse da curva teórica. Assim, foram descritos os procedimentos e considerações adotados para o emprego da CaC em laboratório.

Em se tratando do gerenciamento da energia da CaC, para o modo conectado foi empregado um controle de tensão do link CC através do estágio CA, o qual possibilitou o gerenciamento da CaC por meio do controle da sua corrente de saída. Além do próprio gerenciamento, através dos resultados, constatou-se a redução das oscilações e de distúrbios provenientes do estágio CA na célula.

Com a inclusão do armazenador de energia no estágio CC, foram propostas estratégias para gerir a energia da CaC em transientes de carga e em regime permanente.

No modelo desenvolvido para estas duas propostas, foi levado em consideração a parcela de potência que cada fonte deve suprir ao estágio CA com sua respectiva dinâmica. Não obstante, através dos parâmetros da função de compartilhamento de potência, foi possível definir o valor desejável de erro em regime na tensão do link CC e ajustar a dinâmica de compartilhamento de potência.

Ainda que exista erro de regime para a estratégia proposta, o erro pode ser reduzido por parâmetros desenvolvidos no próprio controlador e reduzido a menos de 1,5% como demonstrado em resultados experimentais.

Por fim, foi apresentada uma proposta para a inicialização da CaC que emprega a técnica de curto-circuito cíclico nos seus terminais e que eleva a sua temperatura no seu processo de inicialização.

A ideia central foi manter a tensão do link CC estável durante o processo de inicialização. Para isso, empregou-se a função ganho escalonado que gera a referência de corrente para o armazenador, permitindo que este opere somente nos transitórios.

Além disso, foi apresentado o impacto das variáveis da célula sobre a tensão de saída do conversor, observando que da temperatura ambiente (24°C) até 65°C pode-se obter um ganho de 20,11% na tensão de saída da CaC.

A estratégia para o emprego da técnica foi discutida e os resultados experimentais mostraram que o aumento do ganho k_{ts} reduz o erro de tensão a 2,4% quando do acionamento da técnica.

8.1 Principais contribuições da tese

As principais contribuições da tese podem ser descritas nos seguintes tópicos:

- ✓ Desenvolvimento de uma bancada de experimentos contendo CaC do tipo PEM e armazenadores de energia em um sistema de geração distribuída. Por meio desse protótipo, uma base de dados associando a CaC em cenários diversos dentro do contexto de GD foi gerado e disponibilizado à comunidade científica.
- ✓ Estudo do gerenciamento da potência fornecida pela CaC em diferentes modos de operação. Ao longo da tese foram propostas três estratégias que, por meio da dinâmica da CaC, associam a operação da célula com uma dinâmica que assegure que transitórios não sejam solicitados e que fenômenos indesejados na CaC não ocorram.
- ✓ Análise das variáveis que impactam na inicialização da CaC associada ao emprego da técnica de curtos-circuitos cíclicos. A técnica foi empregada considerando a CaC como fonte principal da GD, sendo que com a proposta de gerenciamento foi possível

manter a tensão do link CC estável, por consequência, a operação da GD e catalisar o processo de elevação da temperatura na célula.

8.2 Sugestões para a continuidade do trabalho

- ✓ Monitoramento do estado de carga dos armazenadores.

Com a medição do estado de carga dos armazenadores, é possível adicionar esta dinâmica/condição às leis de controle apresentadas em Figura 6.13, por exemplo. O objetivo central com esta inclusão, reside em manter a tensão dos armazenadores estável e em níveis adequados para o gerenciamento proposto.

- ✓ Restauração da tensão do link CC.

Ainda que a proposta apresentada no capítulo 6 possua um erro de tensão do link CC em regime permanente reduzido, propostas que se associem com o compartilhamento de potência no sentido de eliminar o erro da tensão do link CC podem ser investigadas.

- ✓ Inclusão do controle de injeção/absorção de potência da rede de distribuição.

A inserção do controle da corrente da rede de distribuição na estrutura de gerenciamento proposta no capítulo 6, leva a estudos que podem completar este projeto de doutorado.

A estrutura de controle da corrente da rede equivale ao controle da sua potência, uma vez que seja considerada uma rede “forte” com a tensão estável no PAC. Assim sendo, uma possível configuração para a malha de controle da potência da rede de distribuição operando em conjunto com a estrutura do capítulo 6 é apresentada na Figura 8.1.

Nesta figura, além da estrutura já detalhada no capítulo 6, estão representadas as medidas de corrente da rede de distribuição, bem como uma estrutura de controle da tensão do link CC que associa a corrente da rede, da CaC e do armazenador de energia.

Por meio deste cenário, o fluxo de potência entre o estágio CC e CA pode ser estudado de forma detalhada. Desta forma, por exemplo, o ponto de operação da CaC pode ser flexibilizado, uma vez que a rede de distribuição pode cooperar com o fornecimento de potência ao PAC. Além disso, a carga e descarga dos armazenadores de energia podem ser ajustados não apenas pela CaC, mas também pela rede de distribuição.

Figura 8.1: Proposta para a inclusão do controle da corrente da rede de distribuição.

8.3 Trabalhos publicados

Nesta seção, são listados todos os trabalhos de autoria e de co-autoria que foram publicados durante o período de desenvolvimento da tese de doutorado.

8.3.1 Trabalhos publicados em periódicos

Trabalhos completos publicados em periódicos.

FUZATO, GUILHERME; AGUIAR, CASSIUS; BASTOS, RENAN; OTTOBONI, KLEBBER; MACHADO, RICARDO. Voltage Gain Analysis of the Interleaved Boost with Voltage Multiplier Converter Used as Electronic Interface for Fuel Cells Systems. IET Power Electronics (Print), v. 9, p. 1842-1851, 2016.

MOÇAMBIQUE, NILTON E. M.; OTTOBONI, KLEBBER DE A.; FUZATO, GUILHERME H. F.; BASTOS, RENAN F.; GONÇALVES, AMILCAR F. Q.; POZZEBON, GIOVANI G.; DE AGUIAR, CASSIUS R.; MACHADO, RICARDO Q. Tracking Algorithms and Voltage Controllers Used to Obtain the Maximum Power Point of PV Arrays. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 26, p. 661-674, 2015.

AGUIAR, CASSIUS R.; MACHADO, RICARDO Q.; GONÇALVES, AMILCAR F.Q.; BASTOS, RENAN F.; REIS, GIANN B.; NEVES, RODOLPHO V.A.. Frequency fuzzy anti-islanding for grid-connected and islanding operation in distributed generation systems. IET Power Electronics (Print), v. 8, p. 1255-1262, 2015.

AGUIAR, CASSIUS ROSSI; BASTOS, RENAN FERNANDES ; GONÇALVES, AMILCAR F. QUERUBINI ; FUZATO, GUILHERME ; MACHADO, RICARDO QUADROS . Hybrid fuzzy anti-islanding for grid-connected and islanding operation in distributed generation systems. IET Power Electronics (Print), v. 9, p. 512-518, 2015.

GONÇALVES, AMILCAR FLAMARION QUERUBINI; AGUIAR, CASSIUS R.; POZZEBON, GIOVANI G.; MACHADO, RICARDO Q.; BASTOS, RENAN F.. Voltage and power control used to stabilise the distributed generation system for stand-alone or grid-connected operation. IET Power Electronics (Print), v. 9, p. 491-501, 2015.

BASTOS, RENAN F.; AGUIAR, CASSIUS R.; GONCALVES, AMILCAR F. Q.; MACHADO, RICARDO Q.. An Intelligent Control System Used to Improve Energy Production From Alternative Sources With DC/DC Integration. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 5, p. 2486-2495, 2014.

REIS, G. B.; NEVES, R. V. A.; AGUIAR, C. R.; MACHADO, R. Q.; OLIVEIRA, V. A.. A Fuzzy Control Strategy for a Diesel Generating Set under Stand-alone and Grid-Connected Operations. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 24, p. 1-10, 2013.

8.3.2 Trabalhos completos publicados em anais de eventos

Trabalhos completos publicados em anais de eventos.

DE AGUIAR, CASSIUS R.; FUZATO, GUILHERME H. F.; GONCALVES, AMILCAR F. Q.; OTTOBONI, KLEBBER; MACHADO, RICARDO Q.. Out-of-phase automatic reclosing in distributed generation systems with voltage source inverters. In: 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015, Fortaleza. 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015. p. 1-5.

FUZATO, GUILHERME H. F.; DE AGUIAR, CASSIUS R.; OTTOBONI, KLEBBER; FERNANDES, WILLIAN R.; MACHADO, RICARDO Q.. Distributed generation based on Fuel Cell system using a non-isolated high step up DC-DC converter. In: 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015, Fortaleza. 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015. p. 1-5.

FUZATO, G. H. F.; AGUIAR, C. R.; MACHADO, R. Q.; GONCALVES, A. F. Q.; BASTOS, R. F.. Emulador de células a combustível utilizando um conversor buck de

múltiplas fases. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2014, Belo Horizonte. 20º Congresso Brasileiro de Automática, 2014.

GONCALVES, AMILCAR F. Q.; BASTOS, RENAN F.; AGUIAR, CASSIUS R.; MACHADO, RICARDO Q.. Three-phase VSI supplied by renewable energy sources and controlled in voltage and power modes for grid-tie operation. In: 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2014, Galway. 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). p. 1.

MABONI, T.; NEVES, R. V. A.; AGNOLETTI, E. J.; AGUIAR, C. R.; MACHADO, R. Q.. Conversor Buck Aplicado ao Sistema de Excitação de um Grupo Motor Gerador Diesel Conectado à Rede de Distribuição. In: Congresso regional de iniciação científica e tecnológica, 2014, Alegrete. XXVI Congresso regional de iniciação científica e tecnológica, 2014.

AGUIAR, CASSIUS R.; BASTOS, RENAN F.; NEVES, RODOLPHO V. A.; REIS, GIANN B.; MACHADO, RICARDO Q.. Fuzzy positive feedback for islanding mode detection in distributed generation. In: 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2013, Vancouver. 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. p. 1.

AGUIAR, CASSIUS R.; GONCALVES, AMILCAR F. Q.; BASTOS, RENAN F.; POZZEBON, GIOVANI G.; MONTEIRO, JOSE R. B. A.; MACHADO, RICARDO Q. Reduction of positive feedback gain on Anti-islanding method based on frequency. In: IECON 2013 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013, Vienna. IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. p. 7795.

REIS, G. B.; NEVES, R. V. A.; AGUIAR, C. R.; MACHADO, R. Q.; OLIVEIRA, V. A.. Performance Improvement of a Diesel Generating Set with Fuzzy Control for Stand-alone and Grid-connected Operations. In: World Congress on Engineering and Computer Science, 2013, San Francisco. Anais do World Congress on Engineering and Computer Scienc, 2013.

BASTOS, R. F.; AGUIAR, C. R.; NEVES, R. V. A.; GONCALVES, A. F. Q.; MACHADO, R. Q.. Projeto e Análise de um Controlador Inteligente Fuzzy P+I Aplicado no Controle de Conversor CC-CC Bidirecional para Carga e Descarga de Baterias de Chumbo Ácido. In: Simpósio Brasileiro de Automação inteligente -SBAI, 2013, Fortaleza. Simpósio Brasileiro de Automação inteligente, 2013.

NEVES, R. V. A.; REIS, G. B.; AGUIAR, C. R.; BASTOS, R. F.; MACHADO, R. Q.; OLIVEIRA, V. A.. Comparação entre Topologias para Controle de Tensão Terminal e Potência Reativa de um Grupo Motor Gerador Diesel Conectado à Rede de Distribuição. In: Simpósio Brasileiro de Automação inteligente -SBAI, 2013, Fortaleza. Simpósio Brasileiro de Automação inteligente, 2013.

Referências bibliográficas

- [1] A. H. M. Santos and E. C. Bortoni, *Conservação de Energia: Eficiência energética de instalações e equipamentos*. Itajubá - MG: Editora da Unifei, 2006.
- [2] *PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica*, Lei nº 10.438, 2002.
- [3] "Sistema Células a Combustível - Programa Brasileiro - PROCaC," 2002.
- [4] A. D. Filho, "Os 10 anos do Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio - ProH2," ed. Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível - WICaC 2012, 2012.
- [5] D. D. Marquezini, "Interação entre Conversores Chaveados com Baixa Ondulação e Células de Combustível," Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria - RS, 2007.
- [6] F. Z. Ferrigolo, "Instrumentação para Pilhas de Células a Combustível do tipo PEM Visando a Eficiência Energética," Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria - RS, 2009.
- [7] D. B. Ramos, "Gerenciamento da climatização de células a combustível do tipo PEM para integração com a rede de energia elétrica visando à eficiência energética," Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria - RS, 2010.
- [8] L. P. d. Lima, "Integração de Pilhas de Células a Combustível com outras Fontes Alternativas de Energia," Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria - RS, 2009.
- [9] Y. R. d. Novaes, "Contribuição para Sistemas de Processamento de Energia de Células a Combustível," Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC, 2006.
- [10] L. d. S. Caixeta, "Instrumentação e Controle de um Sistema de Célula a Combustível de Membrana Polimérica," Dissertação de mestrado, UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2010.
- [11] F. d. C. Lopes, "Modelagem de Empilhamentos de Células a Combustível PEM por Redes Neurais," Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.
- [12] A. Kirubakaran, S. Jain, and R. K. Nema, "A review on fuel cell technologies and power electronic interface," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2430-2440, 12// 2009.
- [13] "Fuel Cells," ed. <http://www.h-tec.com/en/education/technology/fuel-cells/>: H-TEC EDUCATION, 2013.

-
- [14] "FuelCell Stack Graphic," ed. <https://www.ticonaphotos.com/PL/Forms/DispForm.aspx?ID=716>: Ticona, 2013.
 - [15] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*: J. Wiley, 2003.
 - [16] F. A. Farret and M. G. Simões, *Integration of Alternative Sources of Energy*: Wiley, 2006.
 - [17] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*: Elsevier Science, 2005.
 - [18] K. M. Flores, "Desenvolvimento de membranas híbridas a partir de poli(éter-éter-cetona)sulfonada e copolisilsesquioxanos fosfonados para aplicação em célula a combustível com membrana trocadora de prótons," Dissertação de mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Joinville - SC, 2011.
 - [19] E. A. Muller, A. G. Stefanopoulou, and L. Guzzella, "Optimal Power Control of Hybrid Fuel Cell Systems for an Accelerated System Warm-Up," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 290-305, 2007.
 - [20] Y. Paik, S. A. Chae, O. H. Han, S. Y. Hwang, and H. Y. Ha, "Influence of water and degree of sulfonation on the structure and dynamics of SPEEK studied by solid-state ^{13}C and ^1H NMR," *Polymer*, vol. 50, pp. 2664-2673, 6/5/ 2009.
 - [21] P. Choi, N. H. Jalani, and R. Datta, "Thermodynamics and Proton Transport in Nafion: II. Proton Diffusion Mechanisms and Conductivity," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 152, pp. E123-E130, March 1, 2005 2005.
 - [22] S. Buso and P. Mattavelli, *Digital Control in Power Electronics*: Morgan & Claypool, 2006.
 - [23] F. Sergi, G. Brunaccini, A. Stassi, A. Di Blasi, G. Dispenza, A. S. Aricò, *et al.*, "PEM fuel cells analysis for grid connected applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 10908-10916, 8// 2011.
 - [24] D. D. Marquezini, D. B. Ramos, R. Q. Machado, and F. A. Farret, "Interaction between proton exchange membrane fuel cells and power converters for AC integration," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 2, pp. 151-161, 2008.
 - [25] G. H. F. Fuzato, "Análise de um Conversor Boost Interleaved com Multiplicador de Tensão para Sistemas de Geração Distribuída que Utilizam Células a Combustível como Fonte Primária," Mestrado, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2015.
 - [26] G. H. F. Fuzato, C. R. Aguiar, K. d. A. Ottoboni, R. F. Bastos, and R. Q. Machado. (2016, Voltage gain analysis of the interleaved boost with voltage multiplier converter used as electronic interface for fuel cells systems. *IET Power Electronics* 9(9), 1842-1851. Available: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-pel.2015.0598>
 - [27] C. Shih-Jen, L. Yu-Kang, C. Huang-Jen, and K. Shu-Wei, "High-Efficiency Digital-Controlled Interleaved Power Converter for High-Power PEM Fuel-Cell Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 773-780, 2013.
 - [28] J. Minsoo, M. Ciobotaru, and V. G. Agelidis, "A Single-Phase Grid-Connected Fuel Cell System Based on a Boost-Inverter," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 279-288, 2013.
-

-
- [29] G. Spiazzi, S. Buso, F. Sichirollo, and L. Corradini, "Small-signal modeling of the interleaved boost with voltage multiplier," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE*, 2012, pp. 431-437.
- [30] R. Middlebrook and S. Cuk, "A general unified approach to modelling switching-converter power stages," in *Power Electronics Specialists Conference, 1976 IEEE*, 1976, pp. 18-34.
- [31] R. Q. Machado, S. Buso, and J. A. Pomilio, "A Line-Interactive Single-Phase to Three-Phase Converter System," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 1628-1636, 2006.
- [32] A. F. Q. Gonçalves, "Controle e Análise de Conversores CC-CA Conectados em Redes de Distribuição e Utilizados em Sistemas de Geração Distribuída," Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos - SP, 2010.
- [33] R. Q. Machado, "Sistema de Geração Distribuída com Fontes CA e CC Conectado a Rede Monofásica e Controle Eletrônico da Qualidade da Energia Elétrica," Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas - SP, 2005.
- [34] M. G. Villalva, "Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica," Doutorado, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas - SP, 2010.
- [35] P. Mattavelli, "A closed-loop selective harmonic compensation for active filters," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 37, pp. 81-89, 2001.
- [36] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P. C. Loh, "Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters," *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 153, pp. 750-762, 2006.
- [37] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 1398-1409, 2006.
- [38] I. J. Balaguer, L. Qin, Y. Shuitao, U. Supatti, and P. Fang Zheng, "Control for Grid-Connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 147-157, 2011.
- [39] F. P. Marafão, "Análise e Controle da Energia Elétrica Através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais," Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas - SP, 2004.
- [40] M. S. Padua, S. M. Deckmann, G. S. Sperandio, F. P. Marafao, and D. Colon, "Comparative analysis of Synchronization Algorithms based on PLL, RDFT and Kalman Filter," in *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 964-970.
- [41] J. Ke, R. Xinbo, Y. Mengxiong, and X. Min, "A Hybrid Fuel Cell Power System," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 1212-1222, 2009.
- [42] J. Wei and B. Fahimi, "Active Current Sharing and Source Management in Fuel Cell–Battery Hybrid Power System," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 752-761, 2010.
- [43] J. I. Itoh and F. Hayashi, "Ripple Current Reduction of a Fuel Cell for a Single-Phase Isolated Converter Using a DC Active Filter With a Center Tap," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 550-556, 2010.
-

-
- [44] A. Arce, A. J. d. Real, C. Bordons, and D. R. Ramirez, "Real-Time Implementation of a Constrained MPC for Efficient Airflow Control in a PEM Fuel Cell," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 1892-1905, 2010.
 - [45] M. H. Ramírez, C. Restrepo, J. Calvente, A. Romero, and R. Giral, "Energy Management DC System Based on Current-Controlled Buck-Boost Modules," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 2644-2653, 2014.
 - [46] A. Ghazanfari, M. Hamzeh, H. Mokhtari, and H. Karimi, "Active Power Management of Multihybrid Fuel Cell/Supercapacitor Power Conversion System in a Medium Voltage Microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 1903-1910, 2012.
 - [47] P. Thounthong, S. Rael, and B. Davat, "Control Strategy of Fuel Cell and Supercapacitors Association for a Distributed Generation System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 3225-3233, 2007.
 - [48] L. Cao, K. H. Loo, and Y. M. Lai, "Frequency-Adaptive Filtering of Low-Frequency Harmonic Current in Fuel Cell Power Conditioning Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 1966-1978, 2015.
 - [49] F. Segura, J. M. Andujar, and E. Duran, "Analog Current Control Techniques for Power Control in PEM Fuel-Cell Hybrid Systems: A Critical Review and a Practical Application," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 1171-1184, 2011.
 - [50] S. V. Puranik, A. Keyhani, and F. Khorrami, "State-Space Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 804-813, 2010.
 - [51] C. A. Ramos-Paja, A. Romero, R. Giral, J. Calvente, and L. Martinez-Salamero, "Mathematical analysis of hybrid topologies efficiency for PEM fuel cell power systems design," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, pp. 1049-1061, 11// 2010.
 - [52] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*: Wiley, 2011.
 - [53] J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, T. Zhelev, K. Hemmes, E. Monmasson, S. Jemei, *et al.*, "Distributed Generation: Toward a New Energy Paradigm," *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol. 4, pp. 52-64, 2010.
 - [54] F. Garcia-Torres and C. Bordons, "Optimal Economical Schedule of Hydrogen-Based Microgrids With Hybrid Storage Using Model Predictive Control," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 62, pp. 5195-5207, 2015.
 - [55] J. K. Gruber, M. Doll, and C. Bordons, "Design and experimental validation of a constrained MPC for the air feed of a fuel cell," *Control Engineering Practice*, vol. 17, pp. 874-885, 8// 2009.
 - [56] J. K. Gruber, C. Bordons, and A. Oliva, "Nonlinear MPC for the airflow in a PEM fuel cell using a Volterra series model," *Control Engineering Practice*, vol. 20, pp. 205-217, 2// 2012.
 - [57] W. Garcia-Gabin, F. Dorado, and C. Bordons, "Real-time implementation of a sliding mode controller for air supply on a PEM fuel cell," *Journal of Process Control*, vol. 20, pp. 325-336, 3// 2010.
-

-
- [58] M. H. Ramírez, C. Restrepo, J. Calvente, A. Romero, and R. Giral, "Energy Management of a Fuel-Cell Serial-Parallel Hybrid System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 5227-5235, 2015.
- [59] K. Jin, X. Ruan, M. Yang, and M. Xu, "A Hybrid Fuel Cell Power System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 1212-1222, 2009.
- [60] W. Zhang, D. Xu, X. Li, R. Xie, H. Li, D. Dong, *et al.*, "Seamless Transfer Control Strategy for Fuel Cell Uninterruptible Power Supply System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 717-729, 2013.
- [61] K. Jin, X. Ruan, M. Yang, and M. Xu, "Power Management for Fuel-Cell Power System Cold Start," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, pp. 2391-2395, 2009.
- [62] H. F. Cell, "H-1000 Fuel Cell Stack User Manual," 2013.
- [63] G. H. F. Fuzato, C. R. Aguiar, K. d. A. Ottoboni, R. F. Bastos, and R. Q. Machado, "Voltage gain analysis of the interleaved boost with voltage multiplier converter used as electronic interface for fuel cells systems," *IET Power Electronics*, vol. 9, pp. 1842-1851, 2016.
- [64] G. H. F. Fuzato, C. R. d. Aguiar, K. Ottoboni, W. R. Fernandes, and R. Q. Machado, "Distributed generation based on Fuel Cell system using a non-isolated high step up DC-DC converter," in *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 2015, pp. 1-5.
- [65] M. S. N, O. Tremblay, and L. A. Dessaint, "A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles," in *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009, pp. 1722-1729.
- [66] S. N. Motapon, O. Tremblay, and L.-A. Dessaint, "Development of a generic fuel cell model: application to a fuel cell vehicle simulation," *International Journal of Power Electronics*, vol. 4, pp. 505-522, 2012.
- [67] K. R. Aguiar, G. P. Batalha, M. Peixoto, A. Ramos, and S. H. Pezzin, "Produção de membranas híbridas zirconizadas de SPEEK/Copolissilsesquioxano para aplicação em células a combustível do tipo PEM," *Polímeros*, vol. 22, pp. 453-459, 2012.
- [68] L. Youcai, X. Sichuan, Y. Zhigang, and L. Yongxiang, "Experiment and simulation study on cold start of automotive PEMFC," in *Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 2166-2170.
- [69] W. A. Fuglevand, S. I. Bayyuk, G. Lloyd, P. D. DeVries, D. R. Lott, and J. P. Scartozzi, "Fuel cell power systems and methods of controlling a fuel cell power system," ed: Google Patents, 2002.
- [70] F. Gonzatti, V. N. Kuhn, F. Z. Ferrigolo, M. Miotto, and F. A. Farret, "Theoretical and practical analysis of the fuel cell integration of an energy storage plant using hydrogen," in *Industry Applications (INDUSCON), 2014 11th IEEE/IAS International Conference on*, 2014, pp. 1-6.
-

Anexos

Anexo A

Resultados da CaC fornecidos pelo fabricante

Temperature control

Current(A)	40	30	20	10
Temperature(C)	55	50	46	40

Power curve for stack no. MT14S348-1000

Voltage(V)	37.3	34.6	32.4	31.6
Current (A)	10	20	30	35
Power (W)	373	692	972	1106

Checker
Checking Date
Checking Result

Stack check list

Order No. <u>S0012717</u>	Stack No. <u>MT14S348-1000</u>
Standard product: <u>H-1000</u>	Quality Control Engineer: <u>zhang</u>
Special request: <u>N/A</u>	Testing date: <u>2014-8-20</u>

Surface

___ 1. Controller:	Pass
End plate:	Pass
Casing:	Pass
Blower:	Pass
___ 2. Screws, Nuts and Gaskets:	Pass
___ 3. Label:	Pass
Graphite plate:	Pass
Air tightness, air flow resistance:	Pass
Air tightness:	Pass
The pressure of the stack:	Pass

Stack Performance

___ 1. Open Voltage:	43.2V
___ 2. Output Power:	1000W
___ 3. Working Voltage:	24V-43.2V
___ 4. Stability:	
Running after 12 hours working voltage:	31.6V
Working current:	35.0A

System Control

___ 1. Purging and Short Circuiting	
Interval for purging, short circuit:	Pass
Low voltage protection:	Pass
Controler control:	Pass
Purging time:	Pass
Over temperature protect:	Pass
V A T sampling:	Pass
___ 2. Start up time	
Constant Voltage Start up time:	10S
Constant A Start up time:	10S

Anexo B

Hidratação da membrana polimérica

10. Storage and Re-Use

When finished operating the stack, place it in an enclosed area for storage to keep the stack from getting too dry. The stack should be stored at room temperature.

If the stack is un-used for a long period of time (more than 4 weeks) and its performance goes down 50% to the rated power at 28.8V after 30 minutes operation, we recommend do the following steps.

Note: Generally, injecting water into the stack it is not recommended. Only if the performance of the stack decreases 50% is it recommended to inject water into the stack to activate the stack before operation.

Rejuvenate by injecting water into the stack:

1. Connect a short section of hosing to the gas port marked "**H2 in**".
2. Fill a syringe (not provided) with water (distilled or purified). Make sure there is no air in the syringe. And then connect it to the hose attached to the "H2 in" port.
3. Inject distilled or purified water into the stack until you see water coming out of the "H2 out" port (see picture A below only for reference). Keep the water inside the stack for about 2 minutes. Now disconnect the syringe with the tube, and leave the water in the stack.
4. Purged the water out of the stack as much as possible before use, say, it is not coming out of the output. Connect a short tube to the "H2 out" port. And connect the H2 supply (0.45-0.55Bar) to the stack without a load attached, to purge water out of the stack as much as possible (i.e. letting hydrogen flow through the stack to remove water and other contaminants). Using the fuel cell stack with too much water inside can irreparably damage it! Please see picture B below only for reference. **Make sure the hydrogen supply pressure is 0.45-0.55Bar.**

A

B

WARNING:

1. Please make sure you have purged the water out of the stack as much as possible before use, say, it is not coming out of the output if you injected water into the stack. Using the fuel cell stack with too much water inside can irreparably damage it!
2. The tube between the hydrogen pressure regulator and the fuel cell gas input is required to be less than 30cm.
3. The stack must be standing on the clear plastic feet.

Anexo C

Folha de dados do inversor

SEMITOP Stack 1)

Three-phase inverter

SKS 21F B6U+E1CIF+B6CI 12 V12

SK 60 GB 128

SK 30 GAL 123

SK 95 D 12

P 35/325F

SKHI 20opA

Preliminary Data

Features

- Compact design
- Hall Effect Current Sensor
- Circuit for soft charge the capacitors
- IGBT Braking chopper
- Vce monitoring

Typical Applications

- AC Motor Control
- Elevator
- Industrial

1) Photo non- contractual

Circuit	I_{rms}	V_{ac} (V_{dc})	Types
B6CI	30	380 750 - -	SKS 21F B6U+E1CIF+B6CI 12 V12

Symbol	Conditions	Values	Units
I_{rms} max	No overload; 10 kHz	30	A
$T_{amb} = 35$ °C	150% overload, 60s every 10min (I_{ov}/I_N)	36/24	A
	200% overload, 10s every 10min (I_{ov}/I_N)	42/21	A
V_{ce} max		1200	V
f_{sw} max	Absolute maximum switching frequency	15	kHz
f_{sw} maxCsl	Advise maximum switching frequency	10	kHz
C	Type EPCOS B43303A0687	680/400	µF/V
C_{eqvl}	Equivalent capacitor bank	1700/800	µF/V
$T_{ds\%}$	Discharge time of the capacitor bank	-	s
V_{DC} max	Max DC voltage applied to capacitor bank	750	V
Rectifier		380	V_{ac}
V_{net} max	Max network voltage (line side)	-20%/+15%	
T_{vj}	Junction temperature for continous operation	-40...+125	°C
T_{stg}	without requirement of reforming of capacitors	-20...+40	°C
T_{amb}		-20...+55	°C
V_{isol}	60Hz/1min	2500	V
w	Aprox. total weight	-	Kg
Cooling	Fan, DC power supply	24	V
	Current Consumption (per fan)	0.11	A
	Required air flow (per fan)	42.5	m³/h
Losses	B6CI, Converter at P_{max} , $T_{amb} = 35$ °C	432	W
	Efficiency	97	%
Current sensor	Hall-type LEM LA 55-P		
Thermal trip	normally closed	71	°C
Others components	Relay Metaltex J1NAC3		
Options			
Tests	Functional Test Short Circuit Test Visual Inspection		
	-

B6U+E1CIF+B6CI

Electrical Data

Connectors						
Connector Pin	Symbol	Description	Values			Units
			min.	typical	max.	
CN1:1	TOP W	Top phase W input signal		0/15 (CMOS)		V
CN1:2	ER W	Vce phase W error output signal		0/15 (CMOS)		V
CN1:3	BOT W	Bot phase W input signal		0/15 (CMOS)		V
CN1:4	GND	Ground		0		V
CN1:5	Vin(BRK)	Break input signal		0/15 (CMOS)		V
CN1:6	ER BRK	Vce Break error output signal		0/15 (CMOS)		V
CN1:7	+Vs	Supply voltage	14,0		15,6	V
CN1:8	+Vs	Supply voltage	14,0		15,6	V
CN1:9	GND	Ground		0		V
CN1:10	GND	Ground		0		V
CN2:1	TOP U	Top phase U input signal		0/15 (CMOS)		V
CN2:2	ER U	Vce phase U error output signal		0/15 (CMOS)		V
CN2:3	BOT U	Bot phase U input signal		0/15 (CMOS)		V
CN2:4	GND	Ground		0		V
CN2:5	TOP V	Top phase V input signal		0/15 (CMOS)		V
CN2:6	ER V	Vce phase V error output signal		0/15 (CMOS)		V
CN2:7	BOT V	Bot phase V input signal		0/15 (CMOS)		V
CN2:8	GND	Ground		0		V
CN2:9	+Vs	Supply voltage	14,0	15	15,6	V
CN2:10	+Vs	Supply voltage	14,0	15	15,6	V
CN2:11	GND	Ground		0		V
CN2:12	GND	Ground		0		V
CN2:13		NC				
CN2:14		NC				
CN3:1	+15V	Supply Voltage (positive)	14,5	15	15,5	V
CN3:2	-15V	Supply Voltage (negative)	-14,5	-15	-15,5	V
CN3:3	GND	Ground		0		V
CN3:4	HALL U	Output Hall phase U				
CN3:5	HALL V	Output Hall phase V				
CN3:6		NC				
CN3:7	GND	Ground		0		V
CN3:8	+15V	Supply Voltage (positive)	14,5	15	15,5	V
CN3:9	-15V	Supply Voltage (negative)	-14,5	-15	-15,5	V
CN3:10						
CN4:1	R	Input Phase R	176	220	253	V
CN4:2	S	Input Phase S	176	220	253	V
CN4:3	T	Input Phase T	176	220	253	V
CN4:4		NC				
CN4:5	Earth	Earth				
CN4:6		NC				
CN4:7	W	Output W Inverter Phase		220	253	V
CN4:8	U	Output U Inverter Phase		220	253	V
CN4:9	V	Output V Inverter Phase		220	253	V
CN4:10	-UD	DC Link Negative				
CN4:11	BR	Break Resistor Input				
CN4:12	+UD/BR	DC Link Positive Reference and Break Resistor Input				
K1:1		NC				
K1:2	CIS	Charge Input Signal / Positive FAN Power Supply	0	0/18	26,5	V
K1:3	GND	Ground / Reference FAN Power Supply		0		V
K1:4		NC				

This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.

Anexo D

Esquemático da placa de medição de corrente

Anexo E

Esquemático da placa de medição de tensão

Title		Size		Number		Revision	
A3		A3		A3		A3	
Date: 13/11/2014		Sheet of		Sheet of		Sheet of	
File: C:\Users\condelmon\Documents\SC\HDOC		Drawn By:		Drawn By:		Drawn By:	

Anexo F

Fotos da bancada experimental

Figura F. 1: Visão geral da bancada desenvolvida durante o projeto de doutorado.

Figura F. 2: Visão geral da CaC utilizada no protótipo.

Figura F. 3: Armazenadores (bateria) utilizados no protótipo.