



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Controle de Tensão em uma Microrrede Isolada Empregando Controladores Robustos via Desigualdades Matriciais Lineares

Messias Augusto Lopes Viana

João Monlevade, MG
2022

Messias Augusto Lopes Viana

**Controle de Tensão em uma Microrrede Isolada
Empregando Controladores Robustos via
Desigualdades Matriciais Lineares**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2022**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

V614c Viana, Messias Augusto Lopes.

Controle de tensão em uma microrrede isolada empregando controladores robustos via desigualdades matriciais lineares. [manuscrito] / Messias Augusto Lopes Viana. - 2022.

60 f.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Carga e distribuição elétrica. 2. Controladores elétricos. 3. Falhas de energia elétrica. 4. Geração distribuída de energia elétrica. I. Braga, Márcio Feliciano. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.31

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Messias Augusto Lopes Viana

Controle de tensão em uma microrrede isolada empregando controladores robustos via desigualdades matriciais lineares

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 22 de junho de 2022

Membros da banca

D.Sc. - Márcio Feliciano Braga - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

M.Sc. - Thainan Santos Theodoro - (Universidade Federal de Ouro Preto)

D.Sc. - Rodrigo Augusto Ricco - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Márcio Feliciano Braga, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/07/2022



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Feliciano Braga**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/07/2022, às 18:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0356061** e o código CRC **7CF9C782**.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e determinação para alcançar meus objetivos durante todos os meus anos de estudo.

Aos amigos que fiz ao longo da graduação, pelo companheirismo e pela troca de experiências, que me fez evoluir tanto como formando quanto como pessoa.

Aos professores, pela paciência e dedicação que tiveram ao transmitir seus conhecimentos. Em especial ao Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga, meu orientador, que esteve sempre disposto a sanar dúvidas, compartilhar conhecimentos e experiências.

“Tentar não significa conseguir, mas certamente quem conseguiu tentou.”

– Aristóteles

Resumo

Uma microrrede é definida como uma conexão paralela de unidades de geração distribuída acopladas a uma carga local e pode operar em modo conectado à rede ou isolado. A falta de suporte da rede principal no modo isolado faz com que o sistema apresente comportamentos instáveis indesejados na presença de incertezas, distúrbios e variações. O desconhecimento da carga conectada, aliado à natureza esporádica das fontes de energia renovável, evidenciam a necessidade de um controlador robusto, que atenda às necessidades da carga desconhecida, para a operação em modo isolado. Nesse sentido, o presente trabalho propõe a síntese de controladores robustos, utilizando desigualdades matriciais lineares (LMI, do inglês *Linear Matrix Inequality*), para controlar a tensão da microrrede, lidando com as incertezas da carga e dos parâmetros internos. O controlador projetado utiliza uma abordagem de alocação de polos de modo a corrigir os efeitos devido às perturbações na corrente de carga. Foi observado que os controladores desenvolvidos, levando em consideração as incertezas dos parâmetros, realizaram a alocação dos polos de malha fechada de maneira adequada para quaisquer valores de parâmetros dentro do intervalo determinado. Além disso, os controladores projetados também apresentam uma resposta rápida e robusta a perturbações de carga, com o compensador \mathcal{H}_∞ se mostrando mais rápido quando comparado ao $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$.

Palavras-chave: Microrrede, Controladores Robustos, Alocação de polos, Desigualdades Matriciais Lineares.

Abstract

A microgrid is defined as a parallel connection of distributed generation units coupled to a local load and can operate in grid-connected or isolated mode. The lack of mains support in isolated mode causes the system to present unstable behavior in the presence of uncertainties, changes and variations. The ignorance of connected load, allied to the nature and sporadic nature of energy sources, evidences the need for a robust controller, which meets the needs of the uncertain load, for operation in isolated mode. In this sense, the present work focus in the synthesis of robust controllers, using *Linear Matrix Inequality* (LMI) to control the voltage of the microgrid, dealing with the uncertainties of the load and of the internal parameters. The designed controller employs a pole allocation approach to correct the effects due to disturbances in the load current. It was observed that the controllers developed, which take into account the uncertainties of the parameters, performed the location of the closed loop poles in an adequate way for any values of the parameters within the determined range. Additionally, the controllers also provide a fast and robust response to load disturbances, being the \mathcal{H}_∞ compensator proving to be faster compared to the $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$.

Keywords: Microgrid, Robust Controllers, Pole Placement, LMI.

Lista de ilustrações

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Relação de investimentos ao longo dos anos. | 13 |
| Figura 2 – Microrrede formada por duas unidades Gerador Distribuído (GD) operando em modo isolado. | 15 |
| Figura 3 – Estrutura de uma microrrede de Topologia CA. | 20 |
| Figura 4 – Estrutura de uma Microrrede de Topologia CC. | 21 |
| Figura 5 – Estrutura de uma microrrede de topologia híbrida CC-CA | 22 |
| Figura 6 – Estrutura Hierárquica de Controle em uma Microrrede. | 23 |
| Figura 7 – Diagrama de controle utilizado o sistema coordenado síncrono para duas unidades GD operando em modo isolado. | 25 |
| Figura 8 – Região \mathcal{D} -estável no plano complexo utilizada para alocação de polos. | 29 |
| Figura 9 – Politopo característico para 2 parâmetros incertos. | 30 |
| Figura 10 – Unidade GD da Microrrede operando em modo isolado. | 32 |
| Figura 11 – Diagrama generalizado Controle Misto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ | 35 |
| Figura 12 – Estrutura de controle cascata tensão-corrente com coordenadas síncronas. | 39 |
| Figura 13 – Alocação de polos via Lugar Geométrico das Raízes (LGR) no laço de corrente do controlador cascata convencional tensão-corrente. | 40 |
| Figura 14 – Alocação de polos via LGR utilizando o controlador cascata convencional tensão-corrente considerando os dois laços de controle. | 41 |
| Figura 15 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando o controlador cascata convencional tensão-corrente nos vértices do politopo característico. | 41 |
| Figura 16 – Resposta das componentes de tensão d e q sob à carga CA variável e regulada por um controlador cascata convencional tensão-corrente. | 42 |
| Figura 17 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando os controladores robustos sintetizados em um cenário precisamente conhecido, com valores dos parâmetros do filtro nominais. | 43 |
| Figura 18 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando o controlador $K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty,incerto}$ nos vértices do politopo característico. | 44 |
| Figura 19 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando o controlador $K_{\mathcal{H}_\infty,incerto}$ nos vértices do politopo característico. | 44 |
| Figura 20 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando o controlador $K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty,preciso}$ nos vértices do politopo característico. | 45 |
| Figura 21 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando o controlador $K_{\mathcal{H}_\infty,preciso}$ nos vértices do politopo característico. | 45 |
| Figura 22 – Resposta das componentes de tensão d e q sob à carga CA variável e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ — Cenário 1. | 47 |

| | |
|---|----|
| Figura 23 – Curva das componentes senoidais da tensão entregue à Carga CA dinâmica e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ (a) de 0 s até 0,5 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 1. | 47 |
| Figura 24 – Curva das componentes senoidais da corrente entregue à Carga CA dinâmica e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e $K_{\mathcal{H}_\infty,incerto}$ (a) de 0 s até 0,5 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 1. | 48 |
| Figura 25 – Comparação entre as resposta das componentes de tensão d e q sob à carga CA dinâmica e regulada pelos controladores robustos $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e \mathcal{H}_∞ (a) de 0 s até 0,1 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 1. | 49 |
| Figura 26 – Resposta das componentes de tensão d e q sob à carga CA variável e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ — Cenário 2. | 51 |
| Figura 27 – Curva das componentes senoidais da tensão entregue à Carga CA dinâmica e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ (a) de 0 s até 0,5 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 2. | 51 |
| Figura 28 – Curva das componentes senoidais da corrente entregue à Carga CA dinâmica e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e $K_{\mathcal{H}_\infty,incerto}$ (a) de 0 s até 0,5 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 2. | 52 |
| Figura 29 – Comparação entre as resposta das componentes de tensão d e q sob à carga CA dinâmica e regulada pelos controladores robustos $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e \mathcal{H}_∞ (a) de 0 s até 0,1 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 2. | 53 |

Lista de Siglas

| | |
|------------|---|
| LMI | <i>Linear Matrix Inequality</i> |
| GD | Gerador Distribuído |
| VSC | <i>Voltage Source Converter</i> |
| PAC | Ponto de Acoplamento Comum |
| FOA | <i>Fruit Fly Optimization Algorithm</i> |
| RED | Recurso Energético Distribuído |
| LGR | Lugar Geométrico das Raízes |
| EQM | Erro Quadrático Médio |
| PLL | <i>Phase Locked Loop</i> |

Sumário

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | Contextualização e Justificativa | 13 |
| 1.1.1 | Problema | 14 |
| 1.2 | Estado da arte | 16 |
| 1.2.1 | Contribuições do Trabalho | 17 |
| 1.3 | Objetivos | 17 |
| 1.4 | Organização do Trabalho | 18 |
| 2 | GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES | 19 |
| 2.1 | Conceito | 19 |
| 2.2 | Topologias das Microrredes | 20 |
| 2.2.1 | Microrredes CA | 20 |
| 2.2.2 | Microrredes CC | 21 |
| 2.2.3 | Microrredes Híbridas CC-CA | 21 |
| 2.3 | Controle coordenado de uma Microrrede | 22 |
| 2.4 | Hierarquia de Controle | 22 |
| 2.4.1 | Controle de Corrente e Tensão | 24 |
| 2.4.1.1 | Sistema coordenado síncrono | 24 |
| 2.5 | Conclusões do Capítulo | 25 |
| 3 | MODELAGEM, ESTABILIDADE E CONTROLE DE SISTEMAS DINÂMICOS | 26 |
| 3.1 | Modelo de um sistema | 26 |
| 3.1.1 | Representação em Espaço de Estados | 26 |
| 3.2 | Desigualdades Matriciais Lineares | 27 |
| 3.3 | Região D-estável | 28 |
| 3.3.1 | Incertezas Politópicas | 29 |
| 3.4 | Conclusões do Capítulo | 31 |
| 4 | PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE | 32 |
| 4.1 | Modelagem | 32 |
| 4.2 | Síntese dos Controladores | 34 |
| 4.3 | Especificação de Desempenho | 36 |
| 4.4 | Resultados e Discussão | 37 |
| 4.4.1 | Controlador Convencional | 38 |
| 4.4.2 | Controladores Robustos | 42 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.4.3 | Avaliação de estabilidade e desempenho | 43 |
| 4.4.4 | Avaliação de robustez a mudança da carga | 45 |
| 4.4.4.1 | Cenário 1 | 45 |
| 4.4.4.2 | Cenário 2 | 50 |
| 4.5 | Conclusões do Capítulo | 53 |
| 5 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 55 |
| 5.1 | Proposta de Continuidade | 55 |
| | REFERÊNCIAS | 57 |

1 Introdução

Este capítulo faz uma introdução aos conceitos e assuntos introdutórios que envolvem microrredes e geração Distribuída. É feita uma breve contextualização, análise do cenário atual no Brasil, também é feita uma revisão bibliográfica, apresentação do problema e contribuições do trabalho.

1.1 Contextualização e Justificativa

A crescente demanda de energia a tornou um componente fundamental no desenvolvimento econômico dos países, sendo uma base sólida que garante a estabilidade dos demais setores da sociedade moderna, seja o transporte, construção, instalações industriais e comerciais (SWISHER; JANNUZZI; REDLINGER, 1997). Apesar da matriz energética do Brasil ser predominantemente hídrica, em períodos de escassez hídrica o país recorre as usinas termelétricas, que além de ser mais cara além é poluente (SANTOS, 2019). Diante desse cenário é evidenciada a necessidade de incentivos em pesquisas no setor elétrico, na Figura 1 é apresentada a relação de investimentos ao longo dos anos de acordo com Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) regulado pela ANEEL. Entre 1998 a 2018, foram investidos mais de R\$ 6,5 bilhões em projetos. Devido a essa relevância, no ano de 2007, foi criada a Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética (SPE), uma nova área específica para a gestão de projetos (ANEEL, 2019).

Figura 1 – Relação de investimentos ao longo dos anos.



Fonte: Extraído de ANEEL (2019).

Após o ano de 1990, com o fim do monopólio da geração de energia, devido às crises de petróleo, o país passou por uma reforma no setor elétrico, o que estimulou a competitividade no serviço de energia com outros potenciais, como, por exemplo, a geração distribuída, também houve um aumento em programas de pesquisas em energias renováveis (SIMAS, 2012). Neste contexto, nos anos seguintes são desenvolvidas leis e normas que visem expansão e legitimação do segmento no país, com a criação da Lei N° 10848 de 2004, que regulamenta a comercialização de energia elétrica. E, em 2012 entra em vigor a Resolução Normativa de N° 482, que autoriza o consumidor a fazer uso de energias renováveis para geração de energia elétrica própria, podendo injetar na rede elétrica a produção excedente, que é compensada em forma de créditos, que podem ser consumidos em até 5 anos (GONÇALVES, 2018). A Lei N° 14300 instituída em janeiro de 2022, também conhecida como marco legal da microgeração e minigeração distribuída, modifica as leis N° 9.427/1996 e 10.848/2004 (NACIONAL, 2022). Essa lei colocou em pauta temas como por exemplo, a tarifação do fio B sob os créditos de compensação, e maior flexibilização para o estabelecimento de geração compartilhada (AGUIAR, 2022).

As unidades de produção de energia elétrica usando turbinas eólicas, microturbinas, módulos fotovoltaicos e geradores a diesel são os geradores distribuídos mais relevantes na atual matriz energética brasileira (SIMAS, 2012). De acordo com ANEEL (2022), no mês Março de 2022, o país atingiu a marca de 10 GW de potência instalada, contando com cerca de 922 mil unidades de micro ou minigeração distribuída. Estima-se que até 2031 o montante de geração distribuída possa gerar cerca 117 TWh , o equivalente a soma das energias geradas nas usinas de Itaipu, e Tucuruí I e II (EPE, 2022).

De acordo com (ARMIN et al., 2018), o agrupamento formado por pelo menos um gerador distribuído (GD), cargas e armazenadores é denominado como microrrede, e pode ou não estar conectada à rede elétrica. O controle no modo isolado se mostra desafiador devido a natureza estocástica de fontes de energia renovável associada a rápida mudança na dinâmica da microrrede devido a perturbações de carga, e a ausência do apoio da rede (SEDGHI; FAKHARIAN, 2016).

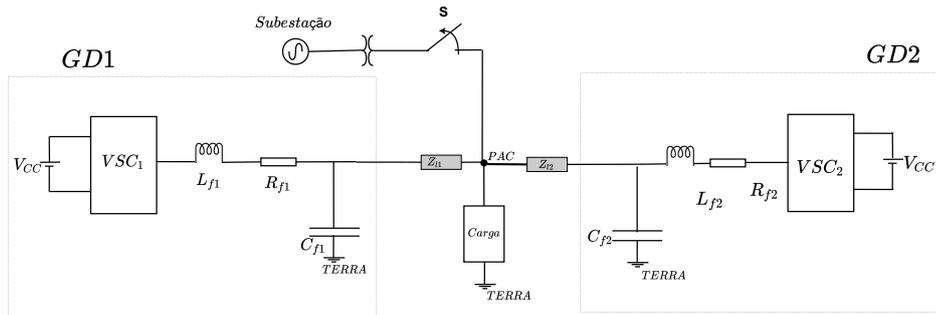
O presente trabalho visa projetar controladores robustos usando desigualdades matriciais lineares (LMIs, do inglês *Linear Matrix Inequalities*) para controlar a tensão na operação em modo isolado de uma microrrede formada pela conexão paralela de duas unidades GD. No procedimento de formulação do controlador, a carga é tomada como um parâmetro desconhecido e também assumem-se incertezas nos valores dos parâmetros do filtro. O controlador utiliza uma abordagem de alocação de polos a fim de corrigir os efeitos devido às perturbações na corrente de carga.

1.1.1 Problema

A Figura 2 apresenta uma microrrede formada por duas unidades GD conectadas a uma carga local usando um inversor e um filtro RLC. Em cada uma das unidades, os

conversores (VSC_1 e VSC_2) são conectados as baterias V_{cc} e a filtros, sendo R_{f1} , L_{f1} e C_{f1} os parâmetros da primeira e, R_{f2} , L_{f2} e C_{f2} da segunda. No modelo adotado também são considerada as impedância da linha, representada por Z_{l1} e Z_{l2} . Como é possível observar, a chave S se encontra aberta, ou seja, a microrrede se encontra em modo isolado. A carga CA é conectada as unidades por meio de um Ponto de Acoplamento Comum (PAC). .

Figura 2 – Microrrede formada por duas unidades GD operando em modo isolado.



Fonte: Adaptado de Pathan et al. (2020).

Em termos práticos, os parâmetros que compõem um circuito não possui estritamente o mesmo valor para os quais foram projetados, seja por efeitos de temperatura, tempo de uso ou faixa de tolerância do fabricante. Dessa forma ao se trabalhar com esses parâmetros é importante que o projetista tenha ciência que os valores nominais, inicialmente conhecidos, podem estar sujeitos a uma distribuição estatística desses valores. Segundo Ioinovici e Horowitz (1985), essas divergências de valores, muitas vezes podem causar mudanças significativas no desempenho do circuito.

Na síntese de controladores de geradores distribuídos devem ser considerados a incerteza da indutância do filtro e a potências injetada, pois podem comprometer o desempenho (SHABESTARI; MEHRIZI-SANI, 2021). Neste trabalho, os parâmetros R , L e C são considerados incertos, de modo que a microrrede deva continuar operando normalmente para uma determinada faixa de valores, aumentando assim a confiabilidade do sistema.

No modo isolado, a ausência de suporte na manutenção da frequência e tensão por parte da rede principal faz com que, em geral, a microrrede apresente uma inércia muito baixa, sendo sensível a mudanças de carga, o que pode causar comportamentos instáveis (TOLIYAT et al., 2016). O desconhecimento da carga conectada, aliado à natureza esporádica das fontes de energia renovável, evidenciam a necessidade de um controlador robusto, que atenda às necessidades da carga desconhecida, para a operação em modo isolado (BABAZADEH; KARIMI, 2011a).

De acordo com Oliveira (2019), uma das principais vantagens do uso de LMIs está no fato de conseguirem solucionar problemas multivariáveis matriciais. Ademais, é possível utilizar uma série de restrições, especificações de projeto, ao problema de otimização

convexa. Além do fato de poderem ser aplicadas em problemas com equações matriciais em que os métodos convencionais falham ou não encontram uma solução.

Tendo isso em mente, fica nítida a exigência de um controlador suficientemente robusto para regular a tensão do sistema, lidando com as incertezas da carga, dos parâmetros internos e com a natureza não linear do sistema. Para tal, deseja-se obter um controlador robusto, via LMIs, para que o sistema se mantenha estável, apresente erro nulo e apresente resposta rápida no transitório.

1.2 Estado da arte

As microrredes devem ser capazes de fornecer suporte de tensão e frequência (MOHAMMADI et al., 2021). Quando no modo conectado, a microrrede tem apoio da rede principal para que a sua frequência e tensão se mantenham dentro dos limites aceitáveis (BABAZADEH; KARIMI, 2011a). Por outro lado, no modo isolado, a falta de apoio da rede principal, a natureza estocástica das fontes de energia renovável e a sensibilidade na mudança de cargas tornam o controle desafiador (SEDGHI; FAKHARIAN, 2016).

Na literatura, são apresentadas em algumas bibliografias o uso de algoritmos de otimização para melhora da resposta do sistema a fim de garantir a integridade dos sinais no atendimento a carga. Em Dong, Liu e Liang (2019), é proposto o ajuste e otimização utilizando o algoritmo de Otimização da Mosca de Fruta (FOA, do inglês *Fruit Fly Optimization Algorithm*), de acordo com os autores a otimização pode melhorar o desempenho, deixando a resposta mais rápida.

Os autores em Sedghi et al. (2018) propõem um compensador baseado na abordagem de controle *droop*, em que se é realizado o controle de potência, corrente e tensão em cascata. Os ganhos dos controladores são otimizados pelo algoritmo Genético e Controle Adaptativo por Modelo de Referência. Os autores realizam a comparação nos cenários de desconexão de unidade GD, perturbação de carga e carga não linear, do controlador proposto com o controlador robusto obtido em Sedghi e Fakharian (2016), e concluem que o controlador proposto apresenta uma performance superior ao controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$.

Outras bibliografias, fazem uso de técnicas LMIs para a melhora na resposta do sistema. Armin et al. (2018) propõe a síntese de um PID robusto para controlar a tensão de uma microrrede monofásica operando em modo isolado, utilizando LMIs para alocação dos polos. Durante o desenvolvimento do compensador a carga é tomada como não modelada e desconhecida e os parâmetros do filtro são tomados como incertos. É feita uma comparação entre o controlador proposto pela abordagem LMI e por Ziegler Nichols, constata-se que o controlador robusto obteve uma melhor performance.

De acordo com Bouzid et al. (2019), os controladores \mathcal{H}_∞ são capazes de garantir estabilidade do sistema na presença de distúrbios externos e mitigar os seus efeitos. Baba-

zadeh e Karimi (2011b) propõem o uso de um controlador \mathcal{H}_∞ de sensibilidade mista, foi observado um bom desempenho no acompanhamento da referência e robustez da tensão apesar das variações de carga.

Em Sedhom et al. (2019) é feita uma modificação do controle *droop* e o uso de um \mathcal{H}_∞ para a regulação da tensão e frequência mediante variações nas cargas. A modificação é justificada pelo método convencional ser conveniente no ajuste de tensão e frequência na presença de cargas não lineares e desequilibradas, e também pela impossibilidade de restauração da tensão e frequência aos seus valores nominais após a variação da carga. O controlador proposto é comparado com o *droop* convencional, apresentando melhores resultados nos quatro cenários de teste sob os quais foram expostos.

Em Babazadeh e Karimi (2011a) e Armin et al. (2020) são desenvolvidos controladores robustos utilizando versões estendidas das abordagens de projeto \mathcal{H}_∞ . Os compensadores apresentaram um bom desempenho quando comparado com a abordagem \mathcal{H}_∞ convencional, sendo que na segunda é obtida uma melhora no valor da norma \mathcal{H}_∞ do controlador.

O controle robusto abordado em Sedghi e Fakharian (2016) faz uso da técnica de controle misto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ para a regulação da tensão de uma microrrede operando em modo isolado. Com base nos três casos críticos analisados, é constatada que a resposta obtida possui um rápido transitório, erro em regime permanente nulo e desempenho robusto na presença de variações bruscas na carga.

1.2.1 Contribuições do Trabalho

O presente trabalho apresenta as seguintes contribuições ao meio acadêmico:

- Revisão da literatura consolidando conceitos, definições e abordagens utilizados no controle de microrredes operando em modo isolado.
- Análise e comparação de desempenho entre os controladores robustos obtidos via LMIs e o controlador em cascata convencional em cenários de incerteza dos parâmetros do filtro que compõe o circuito e a perturbações na carga.

1.3 Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral o projeto e análise de controladores robustos via LMIs, visando lidar com as incertezas dos parâmetros do filtro e perturbações na carga, para a regulação da tensão de uma microrrede operando em modo isolado.

Os objetivos específicos levantados para que o objetivo geral seja alcançado são:

- Levantamento bibliográfico, estudo de abordagens e ferramentas existentes;

- Estudo do problema de controle de tensão de uma microrrede;
- Implementação de técnicas de controle robusto para aplicação na microrrede;
- Validação e testes dos controladores robustos sintetizados pelas técnicas de controle robusto implementadas e, por fim, a comparação com controladores desenvolvidos por estratégias convencionais de projeto na área.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho apresenta quatro capítulos organizados da seguinte maneira:

O Capítulo 2 introduz uma breve revisão literária acerca de Microrredes e Geração Distribuída. Também são feitas a contextualização, a apresentação das topologias e das estruturas de controle.

No Capítulo 3, é apresentada uma revisão da literatura acerca da modelagem, estabilidade e controle de sistemas dinâmicos. Apresenta-se uma abordagem teórica referente a LMIs, análise de estabilidade e sistemas incertos, conceitos necessários para o projeto dos controladores que serão aplicados na planta. Além disso, são apresentados conceitos fundamentais para o desenvolvimento do controlador robusto.

No Capítulo 4, apresentam-se a modelagem do sistema, a síntese do controlador e a discussão dos resultados.

Finalmente, o Capítulo 5 é destinado ao registro das conclusões encontradas a partir dos resultados obtidos e são apresentadas as propostas de continuidade deste trabalho.

2 Geração Distribuída e Microrredes

Neste capítulo são apresentados alguns dos conceitos fundamentais dentro do contexto de microrredes e geração distribuída. Além disso mostrados também as principais topologias e estruturas de controle presentes na literatura.

2.1 Conceito

Mesmo não existindo uma definição consensual para geração distribuída, o termo é comumente usado para se referir ao método de geração no qual as unidades são suficientemente menores que as usinas centrais de produção, ou que alimentam cargas locais diretamente (PURCHALA et al., 2006). As unidades de geração distribuída permitem que o consumidor tenha uma maior autonomia, e um maior grau de liberdade no gerenciamento de sua energia (SANTOS et al., 2014).

Em VIEIRA e CASTRO (2016), a geração distribuída é classificada como micro e mini geração, se diferenciam pela potência instalada na unidade;

- Micro geração distribuída: A produção se dá em pequenas unidades geradoras com potência menor ou igual a 75 KW .
- Mini geração distribuída: Se a potência instalada é superior 75 KW e menor ou igual a 5 MW .

Uma microrrede consiste em um conjunto de geradores distribuídos com armazenadores de energia e cargas locais que podem operar de forma isolada ou conectados à rede principal através de um ponto de acoplamento comum (KHAN, 2016). O conjunto de fontes revoáveis e sistemas armazenadores de energia é nomeado de Recurso Energético Distribuídos (REDs), e deve se encontrar próximo a carga (SANTOS, 2019). Esses sistemas se assemelham as tradicionais redes elétrica em importância, pois também tem os compromissos de geração, transmissão e regulação da energia aos consumidores, porém localmente e em uma menor potência (HAN, 2014).

Elas frequentemente utilizam de recursos de energia renovável, como solar e eólica, o que desempenha um compromisso de desenvolvimento para os sistemas de geração de energia, baixos custos de transmissão e distribuição de energia, diminuição da emissão de gases poluentes e incentivo a pesquisas (DELGHAVI, 2011). Em Khan (2016) são listados alguns benefícios:

- Diminui a emissão de gases poluentes;
- Baixo custo;

- Aumento na confiabilidade de entrega da energia;
- Incentivo em descentralização de geração de energia;
- Baixa perda de energia na transmissão;
- Flexibilidade na configuração do sistema;
- Estimula o crescimento no uso de fontes renováveis.

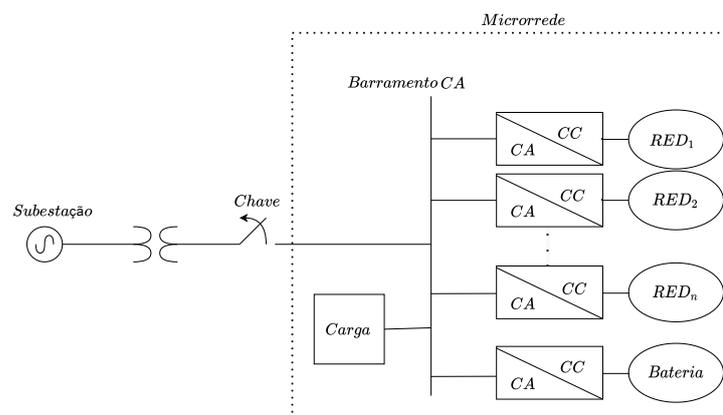
2.2 Topologias das Microrredes

As microrredes surgem com o propósito de promover o controle e coordenação de múltiplas unidades de geração distribuída (FERREIRA et al., 2019). Elas podem contar com diferentes topologias, que se distinguem pelo barramento ao qual suas unidades, cargas e sistemas de armazenamento se encontram conectados, podendo estar ligados a um CA, CC ou ambos simultaneamente (CARNEIRO, 2017).

2.2.1 Microrredes CA

Nessa estrutura, as fontes com saída CA são conectadas ao barramento por meio de um conversor CA/CA, ou diretamente, e as fontes com saída CC através de um conversor CC/CA (FATHIMA et al., 2018). A Figura 3 mostra o esquemático dessa topologia. O modo de operação depende do chaveamento, se a chave se encontra fechada a microrrede se encontra em modo conectado a rede e, quando aberta no modo isolado.

Figura 3 – Estrutura de uma microrrede de Topologia CA.



Fonte: Adaptado de Fathima et al. (2018).

Essa topologia é a utilizado no trabalho, no modo de operação isolado. De acordo com Fathima et al. (2018), quando neste modo a microrrede está conectada a cargas CA através do barramento. Por outro lado, quando conectada, além das cargas CA locais, a

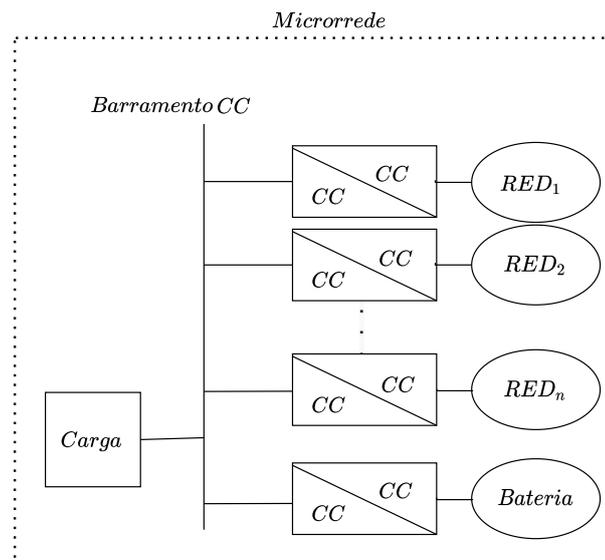
microrrede também se encontra conectada à rede principal por meio do barramento. De acordo com Döhler (2020), o compartilhamento das cargas entre as diferentes fontes é um dos principais desafios dessa topologia.

Quando conectada, os problemas de instabilidade da tensão e frequência são solucionados pela rede principal. No modo isolado a microrrede deve lidar com esses problemas de maneira independente Fathima et al. (2018). Microrredes operando em modo isolado, normalmente, tem sua aplicação em casos em que não se tem acesso a rede, de forma que os custos de construção do ramal sejam inviáveis (CARNEIRO, 2017).

2.2.2 Microrredes CC

As microrredes CC tem as suas fontes de saída CC conectadas ao barramento por meio de conversores CC/CC, ou diretamente, e de saídas CA usando conversores CA/CC. O esquemático desta topologia é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Estrutura de uma Microrrede de Topologia CC.



Fonte: Adaptado de Fathima et al. (2018).

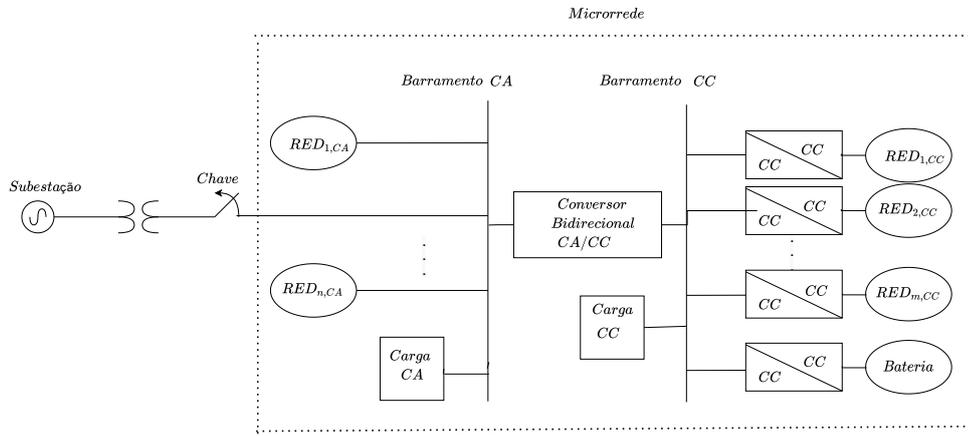
Segundo Fathima et al. (2018), as cargas CC são, normalmente, equipamentos eletrônicos de baixa potência. O número de REDs com saída CC é superior ao de saídas CA, possibilitando menores erros de conversão e, por consequência, aumentando a eficiência global da microrrede (DÖHLER, 2020).

2.2.3 Microrredes Híbridas CC-CA

As microrredes híbridas combinam os benefícios das topologias CC e CA, em que é feita uma integração por meio de um conversor bidirecional CA/CC, sendo possível a redução dos estágios de conversão (SANTOS, 2019). Elas visam reduzir o número de

conversores, de forma que as fontes com saída CA são conectadas ao barramento CA, e as fontes CC são conectadas através de conversores CC/CC (FATHIMA et al., 2018). Na Figura 5 se mostra um esquemático da topologia abordada.

Figura 5 – Estrutura de uma microrrede de topologia híbrida CC-CA



Fonte: Adaptado de Fathima et al. (2018).

2.3 Controle coordenado de uma Microrrede

O Controle Coordenado de uma microrrede pode ou não depender dos canais de comunicação, as que independem de comunicação são chamadas de estratégias de controle descentralizado, enquanto as que dependem são denominadas de controle centralizado (SANTOS, 2019).

No presente trabalho é usada uma técnica descentralizada, que de acordo com Nshuti (2022) devem fazer uso de controladores locais. O controle é feito de acordo com as medições realizadas em cada unidade da microrrede, permitindo que os sistemas que utilizam essa abordagem uma maior confiabilidade (SANTOS, 2019).

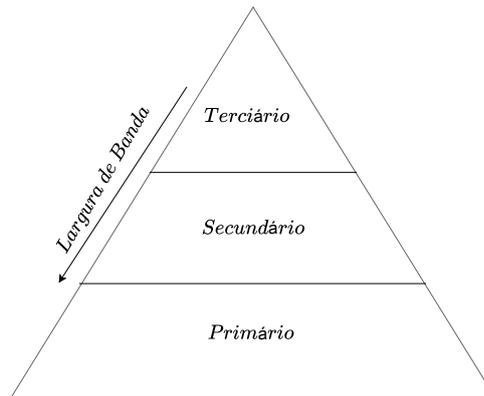
No controle centralizado, existe um controlador central que é conectado a cada unidade GD e envia o sinal de controle mais apropriado com base em uma coleta de informações (NSHUTI, 2022). De acordo com Santos (2019), o compromisso entre as estratégias centralizadas e descentralizadas se dá a partir de níveis Hierárquicos de Controle.

2.4 Hierarquia de Controle

Uma estrutura hierárquica de controle é dividida em três níveis, que são o nível de controle primário, secundário e terciário, tal como apresentado na Figura 6.

De acordo com Bidram e Davoudi (2012), uma estrutura de controle de uma microrrede deve:

Figura 6 – Estrutura Hierárquica de Controle em uma Microrrede.



Fonte: Adaptado de Mohammadi et al. (2021).

- Regular a frequência e tensão para os dois modos de operação.
- Realizar coordenação da RED, e partilhamento adequado da carga.
- Promover a ressincronia do sistema com a rede principal;
- Controlar o fluxo de potência no modo conectado.
- Otimizar o custo de operação.

A distinção nos significados e escalas de tempo dos requisitos exige uma estrutura de controle hierárquica, de forma que o atendimento de cada requisito pode ser feito em um nível da hierarquia mais apropriado (BIDRAM; DAVOUDI, 2012). A hierarquia de controle em diferentes níveis visa o aumento da confiabilidade do sistema por meio de um controle local e independente (NSHUTI, 2022).

Como se é possível observar na Figura 6, a medida que o nível de controle aumenta, a largura de banda diminui. Níveis de controle mais altos são lentos quando comparados com os níveis inferiores (MOHAMMADI et al., 2021). De acordo com Nshuti (2022), a ordens de escala de tempo dos níveis controle na Hierarquia de Controle são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Escala de tempo dos níveis controle na Hierarquia de Controle

| Nível | Tempo Requerido |
|------------|--------------------------------|
| Primário | Microssegundos a Milissegundos |
| Secundário | Segundos |
| Terciário | Minutos |

Fonte: Adaptado de Nshuti (2022).

No primeiro nível de controle, são tratados os problemas de regulação de tensão e corrente para estabilidade do sistema (NSHUTI, 2022). Ele também é responsável por

lidar com o partilhamento da carga (MOHAMMADI et al., 2021). Conforme mencionado em Bidram e Davoudi (2012), esse nível inclui a malha de controle interna, que também conhecida é conhecida como nível zero, e contém os laços de controle e tensão das GD. Devido a não dependência de canais de comunicação, neste nível é preferível o uso de técnicas de controle descentralizados (SANTOS, 2019). Observa-se que pela proposta e objetivos, o presente trabalho age neste nível hierárquico.

O nível de controle secundário realiza a resincronização com a rede e visa restaurar os parâmetros de qualidade de energia aos valores adequados (MOHAMMADI et al., 2021). Ele realiza a compensação dos desvios causados no primeiro nível (BIDRAM; DAVOUDI, 2012). O controle secundário age na restauração da tensão e frequência para as condições normais de operação (NSHUTI, 2022).

No terciário, é realizado o gerenciamento do fluxo de potência entre a rede principal e a microrrede (BIDRAM; DAVOUDI, 2012). Nessa etapa são coletados e analisados os dados da rede e da carga para realização de operações economicamente ótimas (NSHUTI, 2022).

2.4.1 Controle de Corrente e Tensão

De acordo com FATHIMA et al. (2018), a estrutura do controlador em uma microrrede trifásica depende do sistema de coordenadas adotado, podendo ser natural, síncrono ou estacionário. Ainda de acordo com o autor, a interação entre cada fase torna o controle via técnicas no sistema de coordenadas natural bastante complicado.

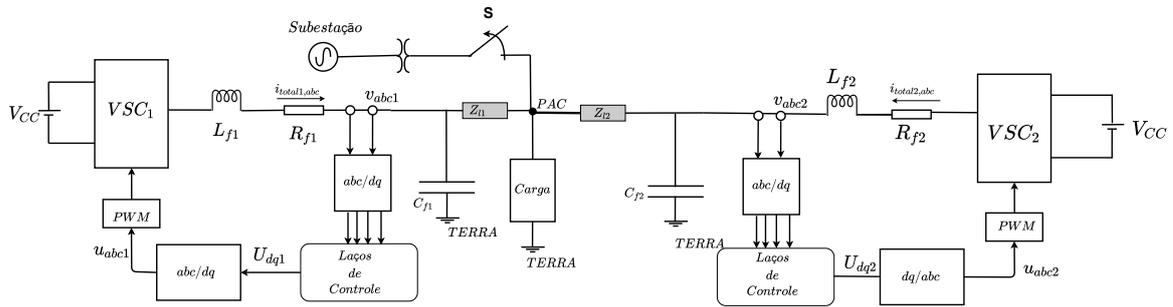
Os sistemas coordenados estacionário e síncrono, quando aplicadas no sistema trifásico equilibrado, reduzem uma dimensão do problema, tornando a análise mais simplificada quando comparada com o natural. O trabalho faz uso do sistema coordenado síncrono, também conhecido como dq , uma vez que além de reduzir a ordem do problema, se obtém componentes de quadratura de valores constantes.

2.4.1.1 Sistema coordenado síncrono

O sistema coordenado síncrono pode ser obtido pelas transformadas de Clarke e Park, em que uma técnica amplamente utilizada para detecção do ângulo de fase da tensão é por meio de um *Phase Locked Loop* (PLL) (KABALCI, 2021). A transformação converte componentes senoidais de tensão e corrente em contínuas de rotação síncrona (FATHIMA et al., 2018).

Na Figura 7, é mostrado um diagrama de controle utilizando as coordenadas dq , nela a estrutura do laço é definida pela lei de controle obtida pela estratégia escolhida. As tensões (v_{abc1} e v_{abc2}) e correntes ($i_{total1,abc}$ e $i_{total2,abc}$) tem suas componentes transformadas de abc para dq , e após passarem pelos laços de controle os sinais de tensão controlada (U_{dq1} e U_{dq2}) são transformados para para as coordenadas abc , sendo u_{abc1} e u_{abc2} .

Figura 7 – Diagrama de controle utilizado o sistema coordenado síncrono para duas unidades GD operando em modo isolado.



Fonte: Adaptado de Sedghi e Fakharian (2016)

2.5 Conclusões do Capítulo

O capítulo contextualizou o conceito de geração distribuída e microrredes, foram apontadas algumas das vantagens para uso de recursos de energia renovável para geração. Apresentou-se também a classificação das usinas de geração distribuída como microgeradores ou minigeradores.

Também foram apresentadas as topologias CC, CA e Híbrida, que se distinguem pelo tipo de barramento que as unidades GD, cargas e baterias se encontram conectadas. Foram também abordadas as principais vantagens e aplicações de cada topologia.

Foram mostradas também as técnicas de controle coordenado, classificadas de acordo com o uso dos canais de comunicação, caso seja feito o uso é denominada de uma estratégia centralizada, caso contrário descentralizada. Mostrou-se a hierarquia de controle de uma microrrede, discutindo brevemente a importância dessas estruturas para o controle do sistema, e função de cada um dos seus três níveis.

Por fim, apresentaram-se as estruturas de controle baseadas no sistema coordenado, que pode ser natural, estacionário e síncrono, dando um enfoque maior ao último, que é o utilizado no trabalho.

Ao longo do capítulo foi feita uma contextualização das informações fornecidas com o problema abordado. O presente trabalho aborda o controle de microrrede de topologia CA. Os controladores desenvolvidos utilizam o sistema coordenado síncrono, e se encontram no nível primário de controle e não dependem de canais de comunicação.

3 Modelagem, Estabilidade e Controle de Sistemas Dinâmicos

O capítulo apresenta os conceitos fundamentais que tangem ao desenvolvimento de controladores robustos, assim como as abordagens, ferramentas e representações utilizadas na literatura de modelagem, estabilidade e controle de sistemas dinâmicos.

3.1 Modelo de um sistema

O modelo matemático de um sistema dinâmico é definido como um conjunto de equações capazes de descrever a dinâmica do sistema. A representação não é única e pode variar quanto à precisão (OGATA, 2011). Durante a modelagem, a complexidade e desconhecimento dos fatores pertinentes exigem a elaboração de algumas hipóteses acerca da operação do sistema (DORF; BISHOP, 2001). Em seu livro, Nise (2011) lista dois métodos de desenvolvimento de modelos matemáticos:

- Funções de Transferência no domínio da frequência;
- Equações de Estado no domínio do tempo.

A modelagem pelo domínio da frequência é uma boa escolha em muitos casos devido à simplicidade e à rapidez da técnica. Todavia, para sistemas mais complexos sua aplicação é inviável. Diante dessa necessidade, surge a abordagem de espaço de estados, que segundo Nise (2011) é um método unificado para modelar, analisar e projetar uma vasta variedade de sistemas.

3.1.1 Representação em Espaço de Estados

De acordo com Dorf e Bishop (2001), o estado de um sistema é um conjunto de variáveis que quando usados em conjunto com as equações de dinâmica e funções de entrada são capazes de fornecer estados e saídas futuros do sistema. De forma genérica, um sistema é representado em espaço de estados por

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t), \quad (3.1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t). \quad (3.2)$$

A equação diferencial (3.1) é chamada de Equação de Estados, na qual $x(t)$ é o vetor de estados, A é a matriz de estados, B é a matriz de entrada e B_d é a matriz de ponderação do sinal de distúrbio $d(t)$. Enquanto que a equação estática (3.2) é chamada de Equação de

Saída, na qual $y(t)$ é o vetor de saída, C é a matriz de saída e D é a matriz de transmissão direta.

Um ponto importante de ser salientado é que, segundo Nise (2011), a escolha do vetor de estados deve atender às seguintes considerações:

- Possuir um número mínimo de variáveis de estado;
- Suas componentes devem ser linearmente independentes.

Ademais, a representação em espaço de estados se mostra conveniente para o problema abordado no presente trabalho, uma vez que cálculos matriciais são realizados no uso de LMI.

3.2 Desigualdades Matriciais Lineares

De acordo com Boyd et al. (1994), as LMIs foram introduzidas por Lyapunov por volta de 1890, quando ele publicou o que hoje é chamado de teoria de Lyapunov. Foi publicada a equação

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t),$$

que é estável se e somente se existir uma matriz definida positiva P , tal que

$$A^T P + P A < 0,$$

sendo chamadas de desigualdades de Lyapunov em P .

A priori, as LMIs eram resolvidas analiticamente em problemas de engenharia, sendo extremamente trabalhosas. Com o desenvolvimento da informática, no início de 1980, observou-se que muitas LMIs poderiam ser resolvidas por computadores por meio de programação convexa, o que estimulou a criação de algoritmos para a sua resolução (SANTOS, 2018).

Segundo Boyd et al. (1994), uma LMI tem a forma

$$F(x) \triangleq F_0 + \sum_{i=1}^m x_i F_i > 0,$$

em que $x \in \mathbb{R}^m$ é uma variável e $F_i = F_i^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $i = 0, \dots, m$. Sendo que $F(x) > 0$ significa que $F(x)$ é definida positiva para todo x , dessa forma, $u^T F(x) u > 0$ para todo $u \in \mathbb{R}^n$.

O emprego de LMIs se mostra uma proposta interessante em uma gama de aplicações de sistemas mais complexos, sobretudo em sistemas de controles modelados matricialmente, representados em espaço de estados.

3.3 Região \mathcal{D} -estável

Introduzida pela primeira vez em Chilali e Gahinet (1996), as regiões LMI têm por finalidade fornecer uma caracterização baseada na teoria de Lyapunov e no agrupamento de polos em sub-regiões de estabilidade no plano complexo (YANG; ROTONDO; PUIG, 2019).

Seja \mathcal{D} uma sub-região pertencente a um plano complexo \mathcal{C} . Um sistema dinâmico de forma $\dot{x}(t) = Ax(t)$ é dito \mathcal{D} -estável se todos os seus autovalores se encontrarem inseridos na sub-região \mathcal{D} (PEAUCELLE et al., 2000). As regiões obedecem a estrutura,

$$\mathcal{D} = z \in \mathcal{C} : \sum_{0 \leq k, l \leq m} c_{kl} z^k z^{*l} < 0.$$

De forma mais generalista, a região LMI \mathcal{D} -estável no plano complexo apresenta a forma (CHILALI; GAHINET; APKARIAN, 1999)

$$\mathcal{D} = z \in \mathcal{C} : L + zM + \bar{z}M^T < 0,$$

em que $M \in \mathbb{R}^{m \times m}$ e $L = L^T \in \mathbb{R}^{m \times m}$.

As principais características de regiões LMI, listadas por Chilali, Gahinet e Apkarian (1999), são:

- Intersecções entre regiões LMI também são regiões LMI;
- Pode-se fazer uma aproximação de uma região convexa simétrica qualquer para uma região LMI, independentemente da precisão que se deseja;
- Uma matriz real é definida como \mathcal{D} -estável se todos os seus autovalores estiverem inseridos na região \mathcal{D} , se e somente se as desigualdades de Lyapunov forem atendidas.

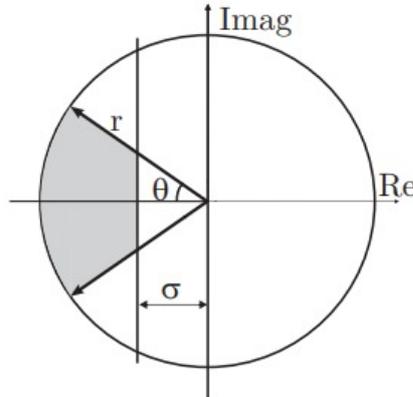
Em Koch et al. (2018), é feito o uso de uma geometria conveniente da região \mathcal{D} -estável no plano complexo. Essa região, mostrada na Figura 8, apresenta uma seção cônica de raio R , abertura θ e delimitada horizontalmente por uma reta que corta o eixo real em σ . Como consequência, pode-se enunciar um teorema que permite obter um controlador por realimentação de estados que garante a estabilidade do sistema contínuo em malha fechada e aloca os polos na região hachurada da Figura 8.

Teorema 3.1 *Dada uma região \mathcal{D} -estável definida por $r > 0$, $0 < \theta < \pi/2$ e $\sigma > 0$, se existirem uma matriz Z e uma matriz P , tal que*

$$AP + PA^T + BZ + Z^T B^T + 2\sigma P < 0, \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} -rP & * \\ AP + BZ & -rP \end{bmatrix} < 0, \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\theta)(AP + PA^T + BZ + Z^T B^T) & * \\ \cos(\theta)(AP - PA^T + BZ - Z^T B^T) & \sin(\theta)(AP + PA^T + BZ + Z^T B^T) \end{bmatrix} < 0, \quad (3.5)$$

Figura 8 – Região \mathcal{D} -estável no plano complexo utilizada para alocação de polos.

Fonte: Koch et al. (2018).

sejam verificadas, então $K = ZP^{-1}$ é a matriz que provê os ganhos do controlador desejado.

Note que (3.3), (3.4) e (3.5) moldam a região \mathcal{D} -estável, apresentada na Figura 8, pela variação dos parâmetros r , θ e σ , que por sua vez são escolhidos de acordo com as especificações de desempenho definidas previamente.

3.3.1 Incertezas Politópicas

Muitas vezes, em termos práticos, os sistemas a serem estudados não possuem parâmetros com valores fixos, mas sim valores incertos dentro de uma faixa. Em Leite et al. (2004) é definido que um determinado estado, não conhecido precisamente, pertence a um politopo de incertezas, de forma que, qualquer matriz dentro deste domínio de incertezas pode ser representado na forma de uma combinação convexa dos vértices do politopo. Dessa forma, uma matriz A incerta, pode ser expressa como

$$A = \{A(\xi) \in \mathbb{R}^{n \times n} : A(\xi) = \sum_{j=1}^N \xi_j A_j; \sum_{j=1}^N \xi_j = 1; \xi_j \geq 0, j = 1, \dots, N\}. \quad (3.6)$$

Koch et al. (2018) apresenta um sistema com incerteza em dois de seus parâmetros, cujos valores devem estar dentro de uma faixa de tolerância em torno de seus valores nominais, com $a \in [a_{min} \ a_{max}]$, $b \in [b_{min} \ b_{max}]$. Esses parâmetros estão contidos nos estados A e B do sistema, sendo assim as equações de estados podem ser reescritas como

$$\dot{x}(t) = A(\xi)x(t) + B(\xi)u(t) + B_d(\xi)d(t), \quad (3.7)$$

$$y(t) = C(\xi)x(t) + D(\xi)u(t), \quad (3.8)$$

em que as matrizes A e B , que se encontram dentro do domínio de incertezas, podem ser expressas algebricamente na forma

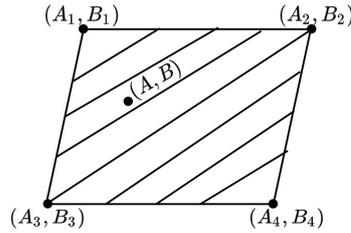
$$(A, B)(\xi) = \sum_{j=1}^4 \xi_j (A_j, B_j); \sum_{j=1}^4 \xi_j = 1; \xi_j \geq 0, j = 1, \dots, 4.$$

Nos vértices do politopo, tem-se

$$\begin{aligned}
 (A_1, B_1) &= (A(a_{min}), B(b_{min})), \\
 (A_2, B_2) &= (A(a_{min}), B(b_{max})), \\
 (A_3, B_3) &= (A(a_{max}), B(b_{min})), \\
 (A_4, B_4) &= (A(a_{max}), B(b_{max})).
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Geometricamente, o número de vértices do politopo característico é 2^q , sendo q o número de parâmetros incertos do sistema, sempre que os parâmetros incertos forem limitados apenas superior e inferiormente. Eles representam os valores críticos que os parâmetros incertos podem possuir. Quaisquer outros valores são obtidos como uma combinação convexa dos vértices. Para um sistema com 2 parâmetros incertos, por exemplo, tem-se um politopo com 4 vértices, como em (3.9), em que a escolha de ξ_i , $i = 1, \dots, 4$, determina um ponto no politopo apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Politopo característico para 2 parâmetros incertos.



Fonte: Autor.

De forma análoga, em Koch et al. (2018) é apresentada a região \mathcal{D} -estável para um sistema com parâmetros incertos. Dessa forma, o Teorema 3.1 pode ser estendido para abordagem politópica.

Teorema 3.2 *Dada uma região \mathcal{D} -estável definida por $r > 0$, $0 < \theta < \pi/2$ e $\sigma > 0$, se para todo A_i e B_i , com $i = 1, \dots, N$ existir uma matriz Z e uma matriz P , tal que*

$$\begin{aligned}
 A_i P + P A_i^T + B_i Z + Z^T B_i^T + 2\sigma P &< 0, \\
 \begin{bmatrix} -rP & * \\ A_i P + B_i Z & -rP \end{bmatrix} &< 0, \\
 \begin{bmatrix} \sin(\theta)(A_i P + P A_i^T + B_i Z + Z^T B_i^T) & * \\ \cos(\theta)(A_i P - P A_i^T + B_i Z - Z^T B_i^T) & \sin(\theta)(A_i P + P A_i^T + B_i Z + Z^T B_i^T) \end{bmatrix} &< 0.
 \end{aligned}$$

sejam verificadas, então $K = ZP^{-1}$ é a matriz que provê os ganhos do controlador desejado.

Note que se $A(\xi)$ for \mathcal{D} -estável, então a estabilidade é garantida para a faixa de valores dos parâmetros incertos.

3.4 Conclusões do Capítulo

O capítulo fez uma breve revisão de conceitos e representações utilizados na modelagem de sistemas dinâmicos. Foram também apresentadas as justificativas do uso da representação em espaço de estados e também as suas vantagens em relação a representações via funções de transferência no domínio da frequência. Também foram apresentados e discutidos algumas das ferramentas fundamentais na síntese de controladores robustos, sendo elas as desigualdades de Lyapunov para estabilidade e Região \mathcal{D} -estável que é usada para alocação de polos. Por fim, foram mostrados conceitos acerca da incertezas politópica de sistemas, e foi apresentada a versão estendida das LMIs de definição da região de alocação.

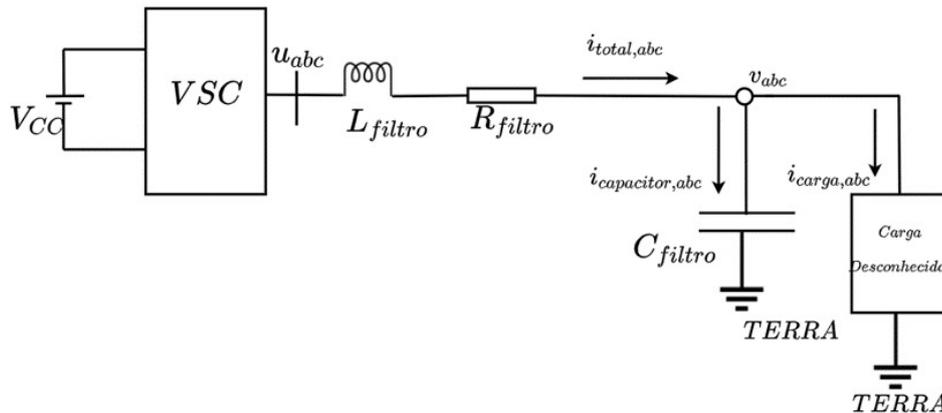
4 Projeto do Sistema de Controle

No capítulo, é analisada e discutida a modelagem do sistema e síntese do controlador utilizando as abordagens e ferramentas discutidas no Capítulo 3, também é feita uma discussão dos resultados obtidos em simulação.

4.1 Modelagem

O controle da microrrede apresentada na Figura 2 requer a modelagem de cada uma das unidades. A Figura 10 mostra uma das unidade GD, que alimenta a carga desconhecida, ela é composta por uma fonte CC acoplada a uma fonte conversora de tensão *Voltage Source Converter* (VSC), que por sua vez está conectada a um filtro.

Figura 10 – Unidade GD da Microrrede operando em modo isolado.



Fonte: Adaptado de Sedghi e Fakharian (2017).

Sedghi e Fakharian (2017) lista algumas considerações que também utilizadas neste trabalho, são elas:

- VSC é considerado um conversor ideal, apenas nos cálculos para fins de simplicidade. Na simulação é considerado não ideal.
- O chaveamento do VSC é tão rápido que é considerado que ele está sempre conduzindo, apenas nos cálculos para fins de simplicidade.

Analisando o nó do circuito apresentado na Figura 10, tem-se

$$i_{total,abc} = i_{carga,abc} + i_{capacitor,abc} = i_{carga,abc} + C_{filtro} \frac{dv_{abc}}{dt}, \quad (4.1)$$

em que $i_{total,abc}$ é a corrente total da unidade. Ao se analisar a malha,

$$u_{abc} = v_L + v_R + v_{abc} = L_{filtro} \frac{di_{total}}{dt} + R_{filtro} i_{total} + v_{abc}. \quad (4.2)$$

em que u_{abc} é a tensão nos terminais do conversor.

As fases abc apresentam uma distribuição espacial em três dimensões. A fim de simplificar os cálculos, faz-se uso de duas transformadas para diminuir uma dimensão na análise do sistema. Inicialmente, na Transformada de Clarke, o espaço de três dimensões abc equilibrado passa para um plano $\alpha\beta$ imaginário, dessa forma,

$$\begin{aligned} V_{\alpha\beta} &= V_a e^{j0} + V_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_c e^{j\frac{4\pi}{3}}, \\ I_{\alpha\beta} &= I_a e^{j0} + I_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + I_c e^{j\frac{4\pi}{3}}. \end{aligned}$$

Apesar de reduzir uma dimensão, os cálculos continuam complexos, pois as novas variáveis possuem componentes alternadas senoidais. Para solucionar o problema faz-se a aplicação da Transformada de Park, que passa as variáveis do plano complexo $\alpha\beta$ para o sistema de coordenadas dq , agora com componentes reais e imaginárias constantes, sendo assim,

$$V_{dq} = V_{\alpha\beta} e^{-j\phi} = V_{dq,max} e^{-j\phi}, \quad (4.3)$$

$$I_{dq} = I_{\alpha\beta} e^{-j\phi} = I_{dq,max} e^{-j\phi}. \quad (4.4)$$

em que $\phi = \omega t$ é o ângulo da transformação de $\alpha\beta$ para dq .

Dessa forma, V_{dq} e I_{dq} podem também ser expressos como,

$$V_{dq} = V_{dq,max} \cos(\phi) + j V_{dq,max} \sin(\phi) = V_d + j V_q, \quad (4.5)$$

$$I_{dq} = I_{dq,max} \cos(\phi) + j I_{dq,max} \sin(\phi) = I_d + j I_q.$$

Aplicando (4.3) e (4.4) em (4.1),

$$i_{total,dq} = i_{carga,dq} + C_{filtro} \left(\frac{V_{dq,max}}{dt} e^{-j\phi} - j\omega V_{dq,max} e^{-j\phi} \right).$$

Isolado o termo dinâmico da equação,

$$\frac{V_{dq,max}}{dt} e^{-j\phi} = \frac{I_{total,dq} - I_{carga,dq}}{C_{filtro}} + j\omega V_{dq,max} e^{-j\phi}$$

Faz-se então $e^{-j\phi} = \cos(\phi) + j \sin(\phi)$,

$$\frac{V_{dq,max}}{dt} (\cos(\phi) + j \sin(\phi)) = \frac{I_{total,dq} - I_{carga,dq}}{C_{filtro}} + j\omega V_{dq,max} (\cos(\phi) + j \sin(\phi)),$$

Comparando com (4.5), obtêm-se:

$$\begin{aligned} \frac{dV_d}{dt} &= \frac{I_{total,d} - I_{carga,d}}{C_{filtro}} + \omega V_q, \\ \frac{dV_q}{dt} &= \frac{I_{total,q} - I_{carga,q}}{C_{filtro}} - \omega V_d. \end{aligned}$$

Utilizando (4.3) e (4.4) em (4.2) e comparando com (4.4), são seguidos os mesmos procedimentos listados para a obtenção das equações dinâmicas nas componentes de V_{dq} ,

$$\begin{aligned}\frac{dI_d}{dt} &= \frac{U_d - R_{filtro}I_{total,d} + V_d}{L_{filtro}} + \omega I_{total,q}, \\ \frac{dI_q}{dt} &= \frac{U_q - R_{filtro}I_{total,q} + V_q}{L_{filtro}} - \omega I_{total,d}.\end{aligned}$$

Analisando a forma geral em espaço de estados politópica em (3.7) e (3.8) e, supondo que R_{filtro} , L_{filtro} e C_{filtro} são parâmetros incertos, tem-se que

$$A(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & \omega & \frac{1}{C_{filtro}(\cdot)} & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & \frac{1}{C_{filtro}(\cdot)} \\ \frac{-1}{L_{filtro}(\cdot)} & 0 & \frac{-R_{filtro}(\cdot)}{L_{filtro}(\cdot)} & \omega \\ 0 & \frac{-1}{L_{filtro}(\cdot)} & -\omega & \frac{-R_{filtro}(\cdot)}{L_{filtro}(\cdot)} \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

$$B(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L_{filtro}(\cdot)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{filtro}(\cdot)} \end{bmatrix},$$

$$B_d(\xi) = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{filtro}(\cdot)} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{C_{filtro}(\cdot)} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C(\xi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

$$D(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

com $x = [V_d \ V_q \ I_{total,d} \ I_{total,q}]^T$, $d = [I_{carga,d} \ I_{carga,q}]^T$, $y = [V_d \ V_q]^T$ e $u = [U_d \ U_q]^T$.

As matrizes de (4.6) até (4.8) são utilizadas no desenvolvimento do controlador, uma vez que essas variáveis de estado pertencentes a (3.7) e (3.8) descrevem a dinâmica do sistema apresentado pela unidade apresentada na Figura 10.

4.2 Síntese dos Controladores

Como previamente discutido, um dos critérios de desempenho desejado é que o sistema em malha fechada possua erro nulo. Uma estratégia interessante para que o controlador permita que a saída controlada seja capaz de seguir o valor de referência da

entrada é realimentar o erro da saída. Na realimentação do erro, é incrementado ao sistema um novo estado, a integral do erro, definida como

$$q(t) = \int_0^t e(\tau) dt,$$

em que

$$\dot{q}(t) = e(t) = r(t) - y(t) = -C(\xi)x(t) - D(\xi)u(t) + r(t),$$

em que $r(t)$ é a referência do sistema do sistema realimentado.

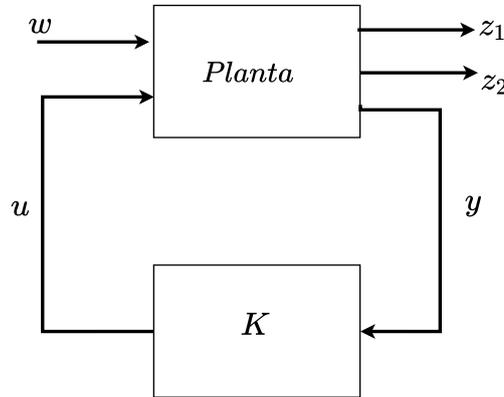
Sendo assim, o sistema aumentado de (3.7) e (3.8), considerando o novo estado é

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{q}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(\xi) & 0 \\ -C(\xi) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ e(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B(\xi) \\ -D(\xi) \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ I \end{pmatrix} r(t), \quad (4.9)$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} C(\xi) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ e(t) \end{pmatrix} + D(\xi)u(t). \quad (4.10)$$

Neste trabalho, emprega-se a estratégia de Controle Misto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ para a síntese do controlador PI robusto, a qual segue de acordo com o diagrama de controle generalizado de uma planta incerta apresentado na Figura 11. Observa-se que é requerida a medição das saídas de referência, que neste caso são definidas como z_1 e z_2 , em decorrência de (4.7).

Figura 11 – Diagrama generalizado Controle Misto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$.



Fonte: Adaptado de Ölçer (2013).

Além disso, define-se um vetor de entradas externas $w(t)$, que contém os sinais de distúrbios do sistema. De modo que a associação de (4.9) e (4.10) e das saídas de referência permitem obter o modelo generalizado dado por

$$\dot{x}(t) = A(\xi)x(t) + B_u(\xi)u(t) + B_w(\xi)w(t) \quad (4.11)$$

$$z_1(t) = C_{z1}(\xi)x(t) + D_{z1u}(\xi)u(t) + D_{z1w}(\xi)w(t)$$

$$z_2(t) = C_{z2}(\xi)x(t) + D_{z2u}(\xi)K)u(t) + D_{z2w}(\xi)w(t)$$

$$y(t) = C_y(\xi)x(t) + D_{yu}(\xi)u(t) + D_{yw}(\xi)w(t). \quad (4.12)$$

Definindo a entrada de controle como $u(t) = Kx(t)$, com $K = [K_p \ K_i]$, tem-se o sistema (4.11)-(4.12) em malha fechada

$$\mathcal{T}_{zw} = \begin{cases} \dot{x}(t) = (A(\xi) + B_u(\xi)K)x(t) + B_w(\xi)w(t), \\ z_1(t) = (C_{z1}(\xi) + D_{z1u}(\xi)K)x(t) + D_{z1w}(\xi)w(t), \\ z_2(t) = (C_{z2}(\xi) + D_{z2u}(\xi)K)x(t) + D_{z2w}(\xi)w(t), \\ y(t) = (C_y(\xi) + D_{yu}(\xi)K)x(t) + D_{yw}(\xi)w(t). \end{cases} \quad (4.13)$$

Em Bonato (2017), são deduzidas as LMIs do problema de controle misto para a análise de um pêndulo rotacional invertido. Tomando como base essas LMIs, é feita uma adequação para abordagem politópica e seguindo a abordagem de minimização utilizada em Gahinet et al. (1996), pode-se enunciar o seguinte teorema.

Teorema 4.1 (Controle Misto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$) *Suponha que o sistema (4.13) seja assintoticamente estável, então $\|T_{zw}(s)\|_\infty < \sqrt{\rho}$, com $\rho = \gamma^2$, e $\|T_{zw}(s)\|_2 < \mu$, com $\text{traço}(Q) \leq \mu$ são garantidos se, e somente se, existirem matrizes simétricas definidas positivas $P \in \mathbb{R}^{m \times m}$ e $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$, tais que¹*

$$\begin{aligned} & \min(\psi_1\mu + \psi_2\rho), \text{ com } 0 < \psi_1, \psi_2 < 1, \\ & \begin{bmatrix} -Q & \star \\ PC^T(\xi) + Z^T D^T(\xi) & -P \end{bmatrix} < 0, \\ & \begin{bmatrix} A(\xi)P + PA^T(\xi) + B_u(\xi)Z + Z^T B_u^T(\xi) & \star & \star \\ B_w & -I & \star \\ C(\xi)P + D(\xi)Z & D_{zw}(\xi) & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0, \end{aligned}$$

sejam satisfeitas. Além disso, asseguram erro nulo para entradas em degrau se a estrutura em (4.9) e (4.10) for utilizada.

4.3 Especificação de Desempenho

Um importante passo na obtenção do controlador é a determinação das especificações de desempenho. Para o sistema em estudo, como se observa na Tabela 2, é desejável que o sinal de tensão apresente erro nulo, tenha uma rápida estabilização para garantir a integridade no atendimento à carga e também que possua um máximo sobressinal (MUP) baixo. O tempo de assentamento do sistema deve ser inferior a um período da referência (PEREIRA et al., 2013). Dessa forma, o tempo de assentamento deve ser inferior a 20 ms, uma vez que corresponde a um período do sinal de referência, com frequência de 50 Hz. Em Dong, Liu e Liang (2019) as componentes da tensão d e q , após a otimização apresentaram máximos sobressinal de 9,1% e 4,46%, respectivamente, *a priori* o valor de o máximo sobressinal utilizado no projeto irá seguir o pior caso apresentado, de 9,1%.

¹ O símbolo \star representa um bloco simétrico na LMI.

Tabela 2 – Especificações desejáveis para a microrrede operando em modo isolado.

| |
|--------------------------|
| $e_{ss} = 0$ |
| $T_s \leq 20 \text{ ms}$ |
| $MUP \leq 9,1\%$ |

Fonte: Autor.

Neste trabalho, as especificações são atingidas via alocação de polos na região do plano complexo apresentada no Teorema 3.2. A relação entre as variáveis r , θ e σ da região \mathcal{D} -estável e as de especificação de desempenho é

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{-\ln(MU)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(MU)}} \right) \quad \text{e} \quad \sigma = \frac{4}{T_s},$$

com $r > 0$. A Tabela 3 apresenta os valores escolhidos para os parâmetros da região de modo que, as especificações requisitadas, possam ser atendidas. Sendo que o valor de r utilizado é o mesmo utilizado em Pereira et al. (2013).

Tabela 3 – Valores de r , θ e σ para que os requisitos desejados possam ser alcançados.

| Especificação | Valor Escolhido |
|------------------------|-----------------|
| $\sigma \geq 200$ | 200 |
| $\theta \leq 52^\circ$ | 52° |
| $r > \sigma$ | 6000 |

Fonte: Autor.

4.4 Resultados e Discussão

Os valores dos parâmetros do sistema usados na obtenção dos ganhos do controlador e simulação do sistema são apresentados na Tabela 4. Para os parâmetros incertos foi atribuída uma variação de $\pm 20\%$ em relação ao valor nominal.

No sistema, a carga apresenta um comportamento dinâmico e não linear, os valores da carga ao longo do tempo são apresentados na Tabela 5.

Após o desenvolvimento dos controladores, é utilizado o *Simulink*, ferramenta integrada ao *Matlab*, para a montagem do esquemático do circuito apresentado na Figura 7 para que os controladores possam ser postos à prova. Conforme mencionado, os laços de controle dizem respeito a estratégia de controle utilizada. Para o controlador convencional, a estrutura de controle dos laços segue o digrama apresentado na Figura 12, para os controladores robustos a montagem é feita com base na lei de controle $u(t) = Kx(t)$, em que $K = [K_p \ K_i]$.

Tabela 4 – Valores dos Parâmetros da microrrede operando em modo isolado composta por 2 unidades GD e com incerteza politópica.

| Parâmetro | Valor Nominal | Faixa de Variação |
|--|---------------|-------------------|
| Corrente fonte CC (V_{CC}) | 680 V | Constante |
| Frequência PWM (f_{sw}) | 8 kHz | Constante |
| Componente fundamental (f) | 50 Hz | Constante |
| Potência nominal (S_{nom}) | 30 KVA | Constante |
| Resistência do filtro ($R_{filtro1}(\cdot)$ e $R_{filtro2}(\cdot)$) | 100 mΩ | [80 mΩ 120 mΩ] |
| Indutância do filtro ($L_{filtro1}(\cdot)$ e $L_{filtro2}(\cdot)$) | 1,35 mH | [1,08 mH 1,62 mH] |
| Capacitância do filtro ($C_{filtro1}(\cdot)$ e $C_{filtro2}(\cdot)$) | 50 μF | [40 μF 60 μF] |
| Resistência da Linha (R_{l1} e R_{l2}) | 230 mΩ | Constante |
| Indutância da Linha (L_{l1} e L_{l2}) | 320 μH | Constante |

Fonte: Adaptado de Sedghi e Fakharian (2016)

Tabela 5 – Dinâmica da carga.

| P_{carga} | Q_{carga} | Tempo |
|-------------|-------------|-------------|
| 18 KW | 0 KVAr | 0,0 – 0,6 s |
| 1 KW | 2 KVAr | 0,6 – 1,0 s |
| 16 KW | 10 KVAr | 1,0 – 1,6 s |
| 10 KW | 3 KVAr | 1,6 – 2,0 s |

Fonte: Autor.

4.4.1 Controlador Convencional

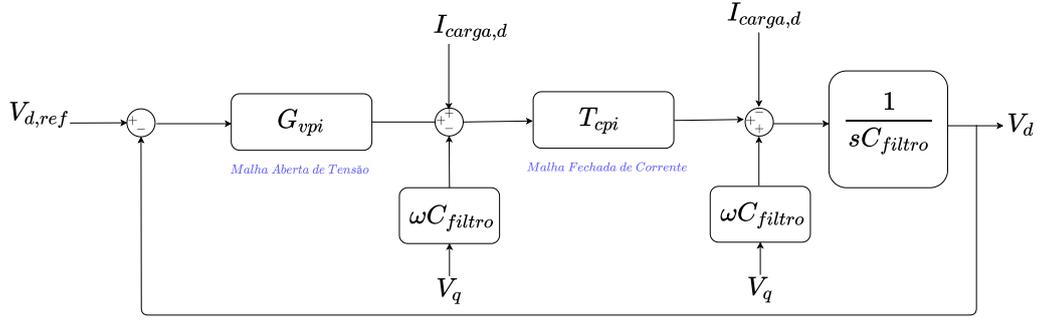
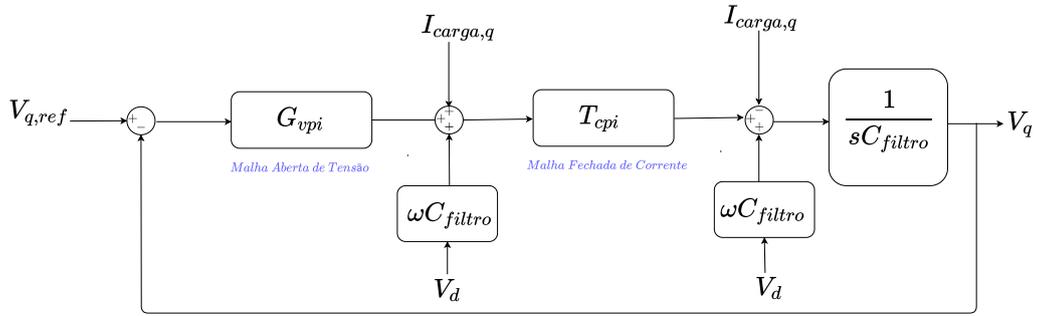
As bibliografias Quan et al. (2018) e Ramezani, Li e Golestan (2017) utilizam de controladores cascata tensão-corrente convencional. Por fins de simplicidade será tomada a segunda como base no desenvolvimento deste controlador, uma vez que ela possui o mesmo sistema de coordenadas que foi utilizado na síntese dos controladores robustos, o síncrono.

De acordo com Smith e Corripio (2008), no controle em cascata o controlador principal, chamado de mestre, faz a regulação do controlador secundário, denominado de escravo. A malha interna de controle deve ser considerada muito mais rápida que a externa (SMITH; CORRIPIO, 2008).

Para o controle desejado, o laço de tensão é tomado como primário, enquanto que o laço de corrente, como secundário. Na Figura 12 é apresentada a estrutura de controle utilizada.

As funções $T_{cpi}(s)$ e $G_{vpi}(s)$ na Figura 12 representam a função de transferência de malha fechada do laço de corrente e a função de malha aberta do controlador, respectivamente. De forma,

Figura 12 – Estrutura de controle cascata tensão-corrente com coordenadas síncronas.


 (a) Componente d .

 (b) Componente q .

Fonte: Adaptado de Ramezani, Li e Golestan (2017).

$$T_{cpi}(s) = \frac{K_{cp}s + K_{ci}}{L_{filtro}s^2 + (R_{filtro} + K_{cp})s + K_{ci}}, \quad (4.14)$$

$$G_{vpi}(s) = \frac{K_{vp}s + K_{vi}}{s}.$$

em que K_{cp} e K_{ci} são os ganhos do controlador PI do laço da corrente, e K_{vp} e K_{vi} são do laço de tensão. De acordo com Ramezani, Li e Golestan (2017), K_{cp} e K_{vp} podem ser obtidos por

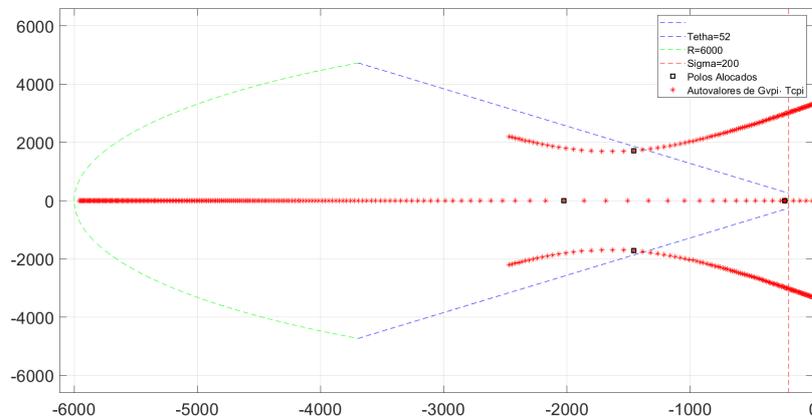
$$K_{cp} = R_{filtro} + \sqrt{R_{filtro}^2 + (L_{filtro} \omega_{bc})^2} \quad (4.15)$$

e

$$K_{vp} = \frac{C_{filtro} \omega_{vb} \left(\sqrt{2(L_{filtro} \omega_{vb})^2 + (K_{pi})^2} - L_{f} \omega_{vb} \right)}{K_{cp}} \quad (4.16)$$

de forma que $\omega_{bc} = 2\pi f_{sw}/10$, e $\omega_{vb} = 0,6\omega_{bc}$. Enquanto que os ganhos K_{ci} e K_{vi} são obtidos via alocação de polos no LGR. Em Dorf e Bishop (2001), o LGR é definido como percurso das raízes do sistema em malha fechada a medida que um parâmetro é alterado.

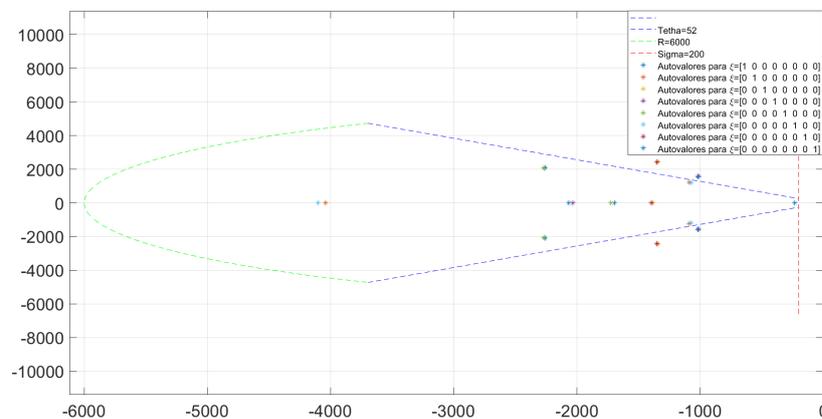
Figura 14 – Alocação de polos via LGR utilizando o controlador cascata convencional tensão-corrente considerando os dois laços de controle.



Fonte: Autor.

A partir da Figura 15, nota-se que, para algumas das incertezas abordadas, os polos alocados pelo sistema compensado não se encontram devidamente alocados, ou seja, estão fora da região desejada.

Figura 15 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando o controlador cascata convencional tensão-corrente nos vértices do polígono característico.

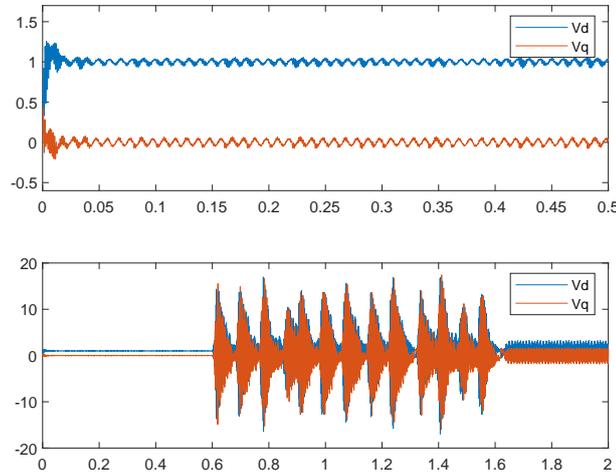


Fonte: Autor.

O controlador convencional desenvolvido também não foi capaz de lidar com as perturbações abruptas da carga. Como mostrado na Figura 16(a), em um cenário precisamente conhecido, com os valores de R_{filtro} , $L_{filtro}(\cdot)$ e $C_{filtro}(\cdot)$ nominais, as componentes de tensão seguem as referências de $1 pu$ e $0 pu$ nas componentes do eixo direto e de quadratura, respectivamente, até $0,5s$, de forma adequada apesar de apresentar um comportamento oscilatório. Observa-se a partir de Figura 16(b) que o comportamento observado anteriormente não se mantém. Depois da primeira variação de carga, a tensão

passa a assumir um comportamento não esperado, variando entre -20 e 20 pu.

Figura 16 – Resposta das componentes de tensão d e q sob à carga CA variável e regulada por um controlador cascata convencional tensão-corrente.



Fonte: Autor.

Nota-se, portanto, que o controlador convencional falhou quando submetido ao intervalo de incertezas dos parâmetros R_{filtro} , $L_{filtro}(\cdot)$ e $C_{filtro}(\cdot)$ adotados e, na mudança de carga, não sendo viável dadas as condições de incertezas e perturbação abordadas no presente trabalho.

4.4.2 Controladores Robustos

Uma vez satisfeitos os Teoremas 3.2 e 4.1, para $\psi_1 = \psi_2 = 0,5$, os ganhos do controlador podem então ser encontrados via rotinas de otimização convexa via *Matlab*, que utilizam os pacotes *Sedumi* (STURM, 1999) e *Yalmip* (LÖFBERG, 2004) para solução e otimização. O controlador $K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty,incerto}$ obtido é

$$K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty,incerto} = \begin{bmatrix} 0,1109 & -0,0916 & -7,7163 & -0,6519 & 180,5628 & -11,4685 \\ 0,0916 & 0,1109 & 0,6519 & -7,7163 & 11,4685 & 180,5628 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Para o projeto do controlador do sistema precisamente conhecido são tomados os valores nominais dos parâmetros, indicados na Tabela 4. Os ganhos do controlador obtidos, se os Teoremas 3.1 e 4.1 forem satisfeitos, para $\psi_1 = \psi_2 = 0,5$, são

$$K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty,preciso} = \begin{bmatrix} -1,4337 & -0,1650 & -10,4013 & -0,8482 & 510,8934 & -0,0000 \\ 0,1650 & -1,4337 & 0,8482 & -10,4013 & 0,0000 & 510,8934 \end{bmatrix}.$$

De acordo com Ölçer (2013), os controladores $K_{\mathcal{H}_\infty,incerto}$ e $K_{\mathcal{H}_\infty,preciso}$, podem ser obtidos a partir dos Teoremas 3.2 e 4.1 considerando $\psi_1 = 0$ e $\psi_2 = 1$. Obtêm-se

$$K_{\mathcal{H}_\infty,incerto} = \begin{bmatrix} 0,1365 & -0,1000 & -8,4289 & -0,6078 & 233,7664 & -9,5173 \\ 0,1000 & 0,1365 & 0,6077 & -8,4290 & 9,5177 & 233,7739 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

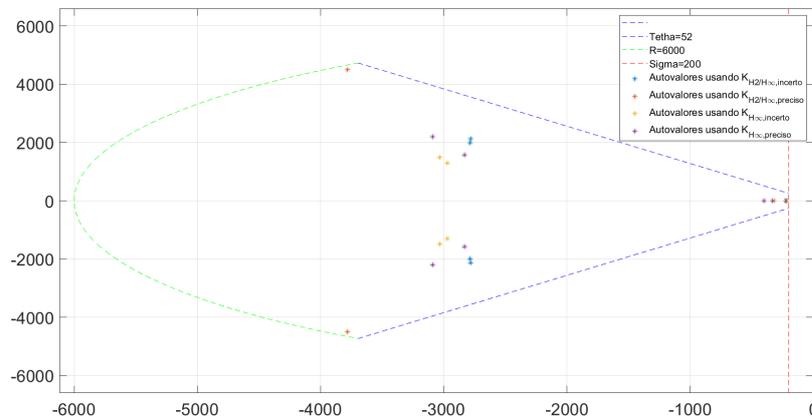
e

$$K_{\mathcal{H}_{\infty},preciso} = \begin{bmatrix} 0,1627 & -0,1577 & -8,0308 & -0,9883 & 238,1623 & 3,9734 \\ 0,0830 & -0,1193 & 0,7983 & -8,7442 & 7,5676 & 380,4620 \end{bmatrix}.$$

4.4.3 Avaliação de estabilidade e desempenho

Afim de se verificar se as especificações de desempenho e de estabilidade são atendidas, faz-se testes dos controladores robustos obtidos nos vértices do polítopo característico para 3 parâmetros incertos. Inicialmente, é feita uma avaliação em um cenário em que os parâmetros $R_{filtro}(\cdot)$, $L_{filtro}(\cdot)$ e $C_{filtro}(\cdot)$ apresentam seus valores nominais, mostrados na Tabela 4. Na Figura 17, é possível observar que os polos alocados pelo sistema compensado pelos controladores $K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_{\infty},incerto}$, $K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_{\infty},preciso}$, $K_{\mathcal{H}_{\infty},incerto}$ e $K_{\mathcal{H}_{\infty},preciso}$ se encontram devidamente alocados dentro da região \mathcal{D} -estável estabelecida na Tabela 3.

Figura 17 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando os controladores robustos sintetizados em um cenário precisamente conhecido, com valores dos parâmetros do filtro nominais.



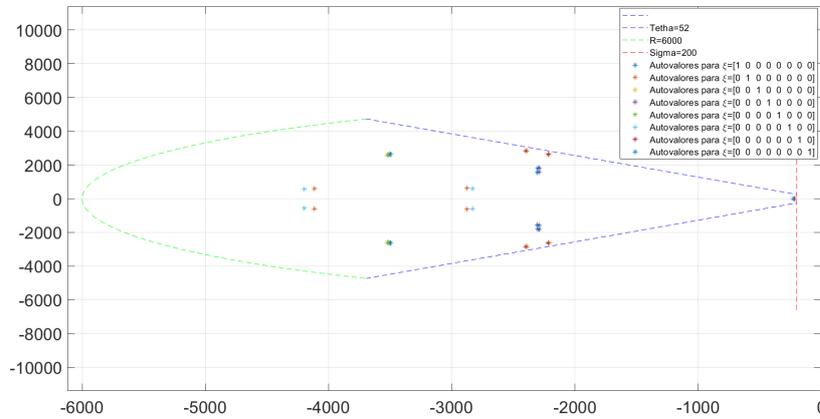
Fonte: Autor.

Como mencionado no capítulo anterior, a incerteza politópica de um sistema incerto pode ser representada geometricamente por um polítopo característico, cujos vértices representam os valores críticos que os parâmetros incertos podem possuir. O presente trabalho considera a incerteza de 3 parâmetros, ou seja, 8 vértices.

O teste com os controladores robustos sintetizados neste cenário são apresentados nas Figuras 18 a 21. Observa-se que os controladores $K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_{\infty},incerto}$ e $K_{\mathcal{H}_{\infty},incerto}$ alocaram corretamente os polos alocados. Por outro lado, os controladores $K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_{\infty},preciso}$ e $K_{\mathcal{H}_{\infty},preciso}$, para alguns vértices alocou os polos em malha fechada fora da região desejada.

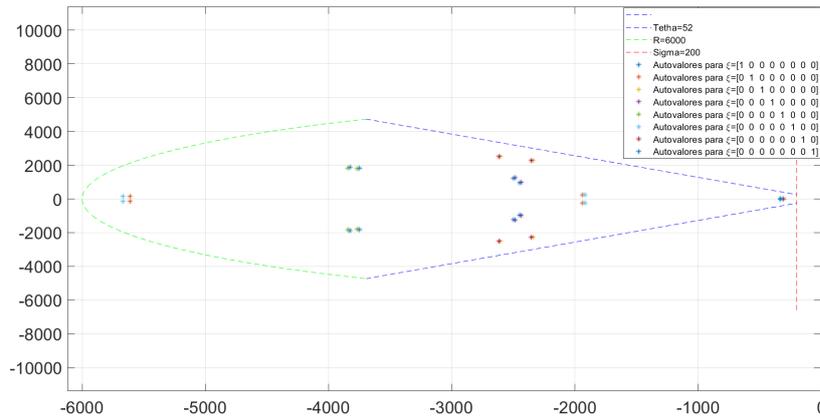
Conforme observado, os controladores robustos desenvolvidos considerando a incerteza politópica limitadas pelos intervalos indicados na Tabela 4 apresentaram desempenho

Figura 18 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando o controlador $K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty,incerto}$ nos vértices do polítopo característico.



Fonte: Autor.

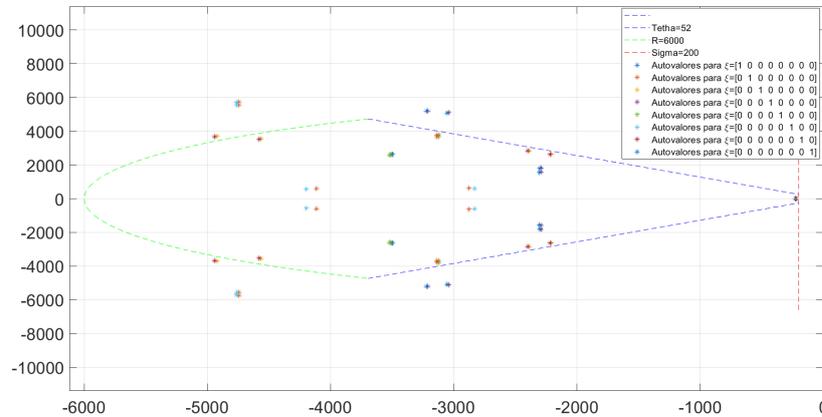
Figura 19 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando o controlador $K_{\mathcal{H}_\infty,incerto}$ nos vértices do polítopo característico.



Fonte: Autor.

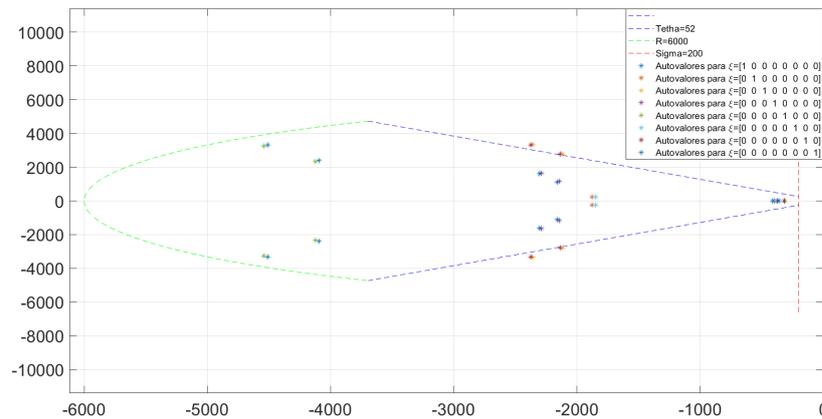
em malha fechada que obedecem as especificações delimitada na região \mathcal{D} -estável. Por outro lado, os controladores desenvolvidos levando em conta apenas o cenário precisamente conhecido, com os valores nominais, falharam quando submetidos ao intervalo de incertezas dos parâmetros $R_{filtro}(\cdot)$, $L_{filtro}(\cdot)$ e $C_{filtro}(\cdot)$ adotados, não sendo assim recomendáveis para o problema abordado. Uma vez verificados que os controladores $K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty,incerto}$ se encontram devidamente alocados na região \mathcal{D} -estável, são realizados novos testes com estes dois controladores para que seja verificada a robustez a perturbações da carga.

Figura 20 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando o controlador $K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty, preciso}$ nos vértices do polítopo característico.



Fonte: Autor.

Figura 21 – Alocação dos polos em malha fechada utilizando o controlador $K_{\mathcal{H}_\infty, preciso}$ nos vértices do polítopo característico.



Fonte: Autor.

4.4.4 Avaliação de robustez a mudança da carga

Nesta etapa é analisado o efeito que os controladores impõe sobre a microrrede. Os cenários verificados são pontos aleatórios representam duas combinações de $R_{filtro}(\cdot)$, $L_{filtro}(\cdot)$ e $C_{filtro}(\cdot)$ aleatórias delimitadas pelos intervalos apresentados na Tabela 4 e devem satisfazer (3.6).

4.4.4.1 Cenário 1

Para $\xi = [0,1888 \ 0,2099 \ 0,0294 \ 0,2116 \ 0,1465 \ 0,0226 \ 0,0645 \ 0,1267]$, tem-se $R_{filtro}(\cdot) = 93,90 \text{ m}\Omega$, $L_{filtro}(\cdot) = 1,26 \text{ mH}$ e $C_{filtro}(\cdot) = 49,99 \text{ }\mu\text{F}$, e com matrizes

expandidas

$$A(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 314,16 & 20243 & 0 & 0 & 0 \\ -314,16 & 0 & 0 & 20243 & 0 & 0 \\ -792,53 & 0 & -74,386 & 314,16 & 0 & 0 \\ 0 & -792,53 & -314,16 & -74,386 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 792,53 & 0 \\ 0 & 792,53 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C(\xi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } D(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Aplica-se os ganhos do controlador $K_{\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty, \text{incerto}}$ sob a matriz A . Em malha fechada

$$A_{mf}(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 314,16 & 20243 & 0 & 0 & 0 \\ -314,16 & 0 & 0 & 20243 & 0 & 0 \\ -704,68 & -72,592 & -6189,8 & -202,46 & 1,431 \times 10^5 & -9089,2 \\ 72,592 & -704,68 & 202,46 & -6189,8 & 9089,2 & 1,431 \times 10^5 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

com vetor de autovalores $\lambda(A_{mf}(\xi))$,

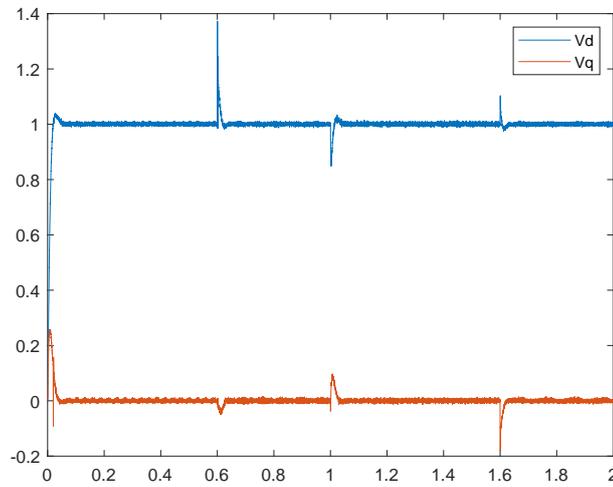
$$\lambda(A_{mf}(\xi)) = \begin{bmatrix} -3220,1 + j1303,3 \\ -3220,1 - j1303,3 \\ -3218,6 + j1157 \\ -3218,6 - j1157 \\ -315,92 + j0,38105 \\ -315,92 - j0,38105 \end{bmatrix}.$$

A partir da Figura 22, observa-se que as componentes de tensão V_d e V_q da carga apresentam uma resposta rápida e robusta a variações na carga e, que nos instantes de mudança de carga, 0,6 s, 1,0 s e 1,6 s as componentes são afetadas, mas posteriormente voltam a seguir as referências de 1 pu e 0 pu nas componentes do eixo direto e de quadratura, respectivamente.

Na Figura 23(a) é possível verificar que a tensão alternada entregue à carga possui um comportamento esperado, pois além de manter um aspecto senoidal, possui uma amplitude muito próxima do valor de pico referência de 1 pu, e constante. A Figura 23(b) demonstra que o seu comportamento se mantém adequado em toda faixa de tempo analisada, mesmo sob efeito das mudanças de carga.

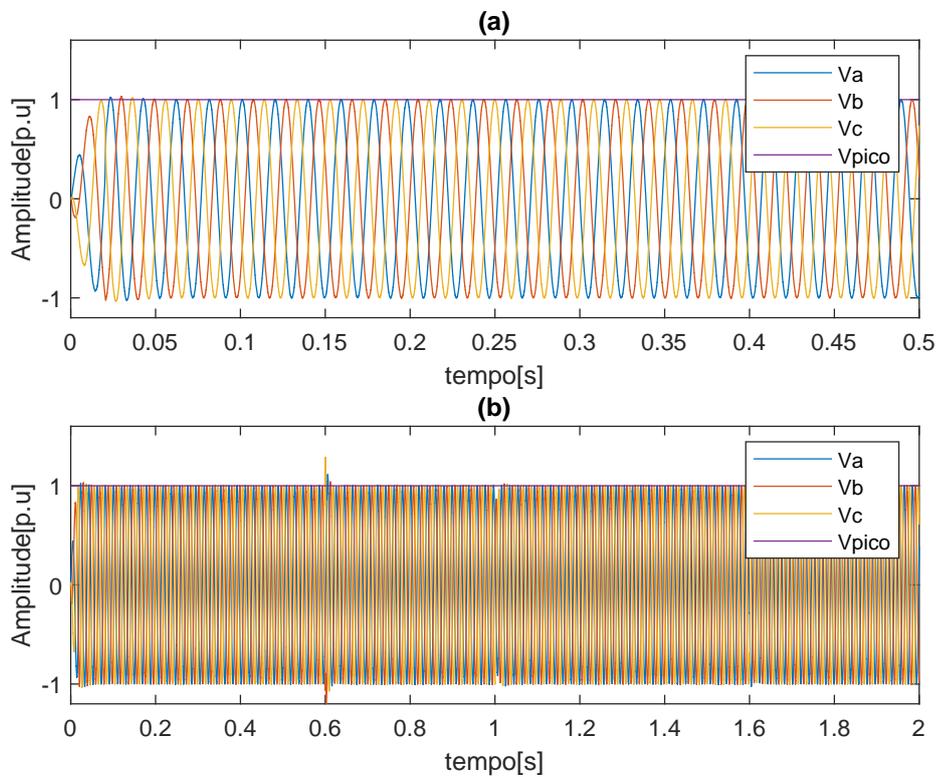
Assim como na tensão, a corrente entregue à carga apresenta um aspecto senoidal e estável a variação da carga, na Figura 24(a) observa-se que ela possui um aspecto senoidal e estável. A curva mostrada na Figura 24(b) demonstra que o chaveamento da carga altera

Figura 22 – Resposta das componentes de tensão d e q sob à carga CA variável e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ — Cenário 1.



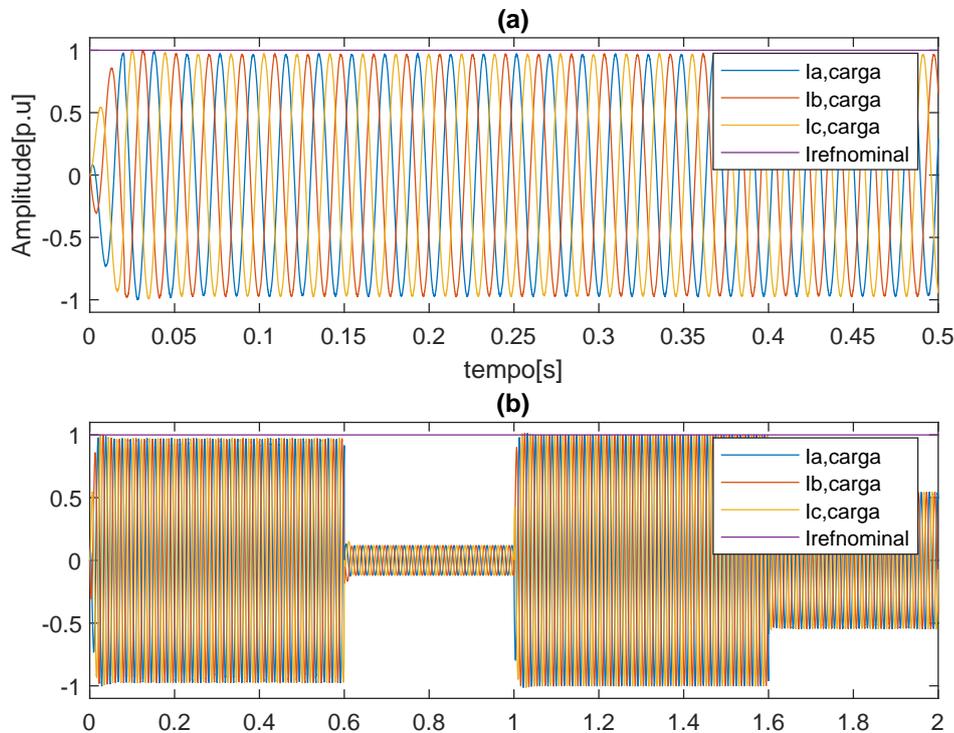
Fonte: Autor.

Figura 23 – Curva das componentes senoidais da tensão entregue à Carga CA dinâmica e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ (a) de 0 s até 0,5 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 1.



Fonte: Autor

Figura 24 – Curva das componentes senoidais da corrente entregue à Carga CA dinâmica e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e $K_{\mathcal{H}_\infty,incerto}$ (a) de 0 s até 0,5 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 1.



Fonte: Autor

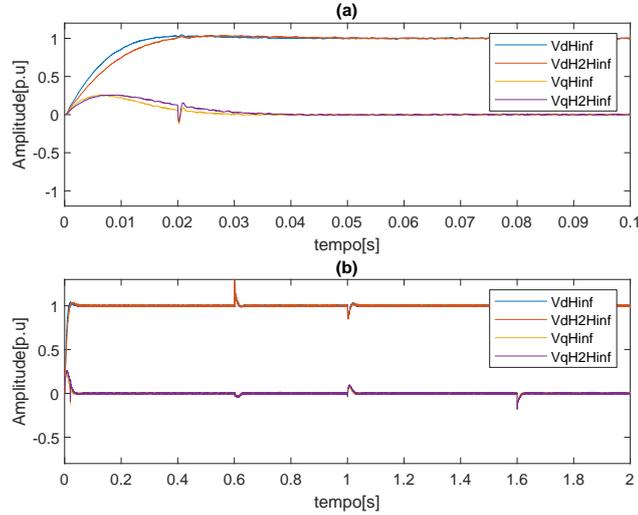
a amplitude da corrente de forma a atender as novas potências demandadas, e se mantém com seu aspecto e estabilidade mesmo sob efeito das mudanças de carga.

O uso dos ganhos do controlador robusto obtido em (4.19) produz respostas de tensão e corrente de comportamento semelhante ao analisado, com a ressalva que o controlador utilizando a abordagem \mathcal{H}_∞ apresenta uma resposta mais rápida do que $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$, vide Figura 25.

O computo das especificações de desempenho pode ser feito através da função *stepinfo*, uma ferramenta nativa do *Matlab*. Na tabela 6 é feita uma comparação de desempenho dos controladores $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e \mathcal{H}_∞ de 0 s até 0,1 s, as observações feitas neste intervalo se mantêm válidas longo de todo o espectro analisado. O controlador \mathcal{H}_∞ apresentou uma melhoria no tempo de assentamento ao passo que o $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ no máximo sobressinal.

E como apresentado na Tabela 7, o controlador robusto \mathcal{H}_∞ também apresentou um indicativo de Erro Quadrático Médio (EQM) menor, quando comparado com o $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$. Sendo o EQM da tensão calculado por,

Figura 25 – Comparação entre as resposta das componentes de tensão d e q sob à carga CA dinâmica e regulada pelos controladores robustos $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e \mathcal{H}_∞ (a) de 0 s até 0,1 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 1.



Fonte: Autor

Tabela 6 – Comparação de desempenho da componente d de tensão utilizando os controladores robustos $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e \mathcal{H}_∞ — Cenário 1.

| | $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ | \mathcal{H}_∞ |
|-------|------------------------------------|----------------------|
| T_s | 0,0097 | 0,0096 |
| MUP | 0,0697 | 0,2587 |

Fonte: Autor.

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{ref} - V_i)^2$$

com n sendo o número de dados analisados, V_{ref} o valor da tensão desejada e V a tensão real.

Tabela 7 – Comparação entre os índices EQM das componentes dq de tensão utilizando os controladores robustos $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e \mathcal{H}_∞ — Cenário 1.

| | $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ | \mathcal{H}_∞ |
|---------|------------------------------------|------------------------|
| EQM_d | 0,9969 | 0,0018 |
| EQM_q | $5,356 \times 10^{-4}$ | $4,213 \times 10^{-4}$ |

Fonte: Autor.

4.4.4.2 Cenário 2

Considerando $\xi = [0, 184 \ 0, 1958 \ 0, 0716 \ 0, 1763 \ 0, 1699 \ 0, 0422 \ 0, 0309 \ 0, 1293]$, com $R_{filtro}(\cdot) = 94,77 \text{ m}\Omega$, $L_{filtro}(\cdot) = 1,25 \text{ mH}$ e $C_{filtro}(\cdot) = 48,85 \mu\text{F}$, obtêm-se as matrizes expandidas

$$A(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 314,16 & 20470 & 0 & 0 & 0 \\ -314,16 & 0 & 0 & 20470 & 0 & 0 \\ -799,97 & 0 & -75,809 & 314,16 & 0 & 0 \\ 0 & -799,97 & -314,16 & -75,809 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 799,97 & 0 \\ 0 & 799,97 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C(\xi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } D(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Aplicam-se os ganhos do controlador, apresentados em (4.18), à matriz A . Dessa forma, em malha fechada,

$$A_{mf} = \begin{bmatrix} 0 & 314,16 & 20470 & 0 & 0 & 0 \\ -314,16 & 0 & 0 & 20470 & 0 & 0 \\ -690,77 & -79,997 & -6818,7 & -172,06 & 1,8701 \times 10^5 & -7613,5 \\ 79,997 & -690,77 & 171,98 & -6818,7 & 7613,9 & 1,8701 \times 10^5 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

cujos autovalores $\lambda(A_{mf}(\xi))$ é

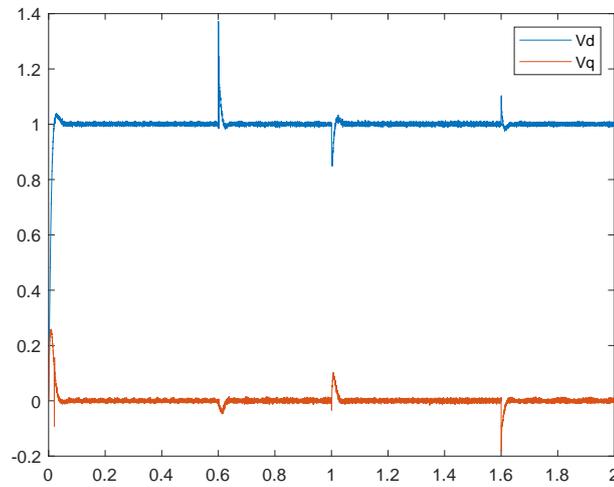
$$\lambda(A_{mf}(\xi)) = \begin{bmatrix} -3253,9 + j1325,6 \\ -3253,9 - j1325,6 \\ -3249,5 + j1184,6 \\ -3249,5 - j1184,6 \\ -315,26 + j1,0684 \\ -315,26 - j1,0684 \end{bmatrix}.$$

As tensões nas componentes de tensão V_d e V_q , assim como no Cenário 1, seguem a referência aplicada, sofrendo leves distorções nos instantes de mudança de carga, que rapidamente se estabilizam e voltam a seguir as referências, como mostrado na Figura 26.

Pelas Figuras 27(a) e 27(b), observa-se que a tensão alternada entregue à carga possui comportamento adequado, mantendo aspecto senoidal e amplitude muito próxima do valor nominal.

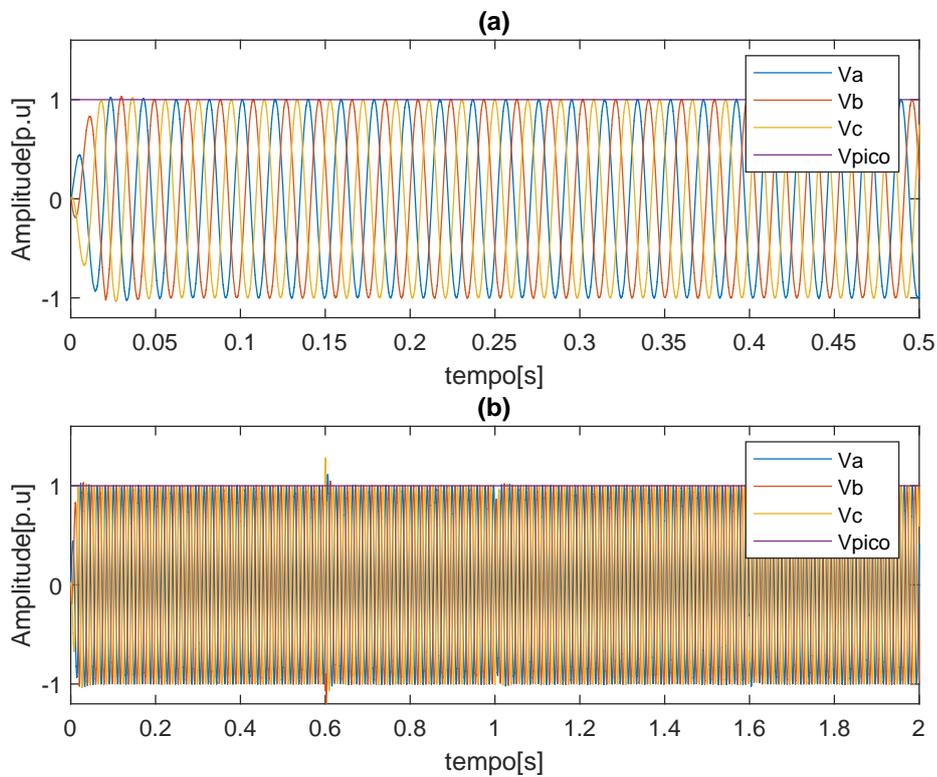
A partir das Figuras 28(a) e 28(b) pode-se observar que a corrente da carga possui robustez a variação da carga, forma senoidal e estável.

Figura 26 – Resposta das componentes de tensão d e q sob à carga CA variável e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ — Cenário 2.



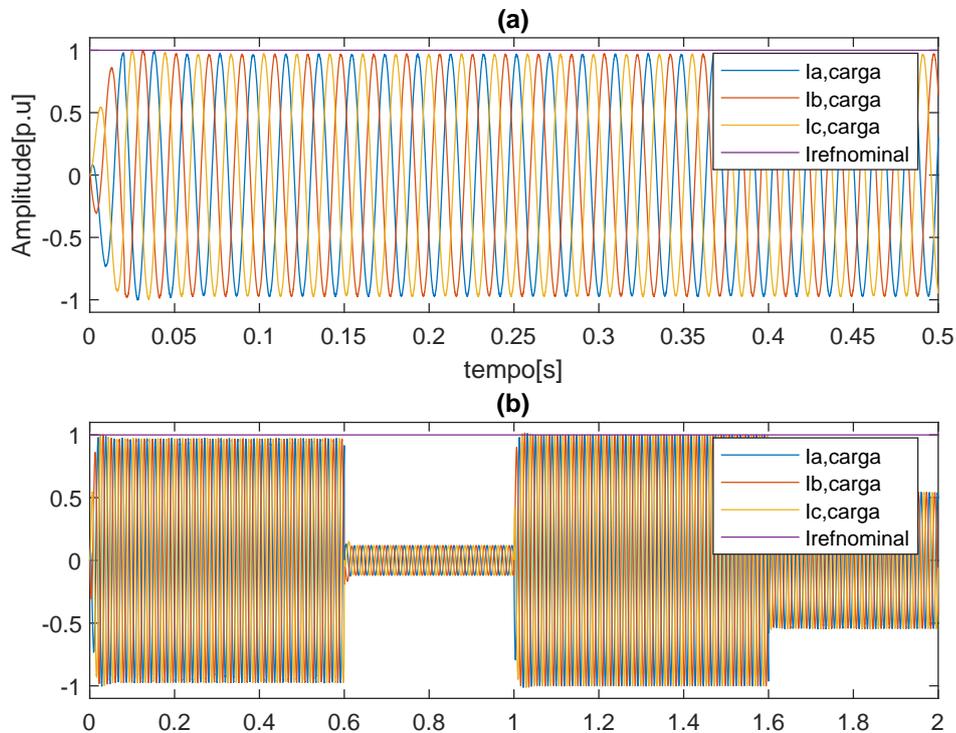
Fonte: Autor.

Figura 27 – Curva das componentes senoidais da tensão entregue à Carga CA dinâmica e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ (a) de 0 s até 0,5 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 2.



Fonte: Autor.

Figura 28 – Curva das componentes senoidais da corrente entregue à Carga CA dinâmica e regulada por um controlador robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e $K_{\mathcal{H}_\infty,incerto}$ (a) de 0 s até 0,5 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 2.



Fonte: Autor.

Assim como observado no cenário anterior, o sistema produz uma resposta mais rápida quando utiliza o controlador com abordagem \mathcal{H}_∞ ao invés de $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$, como apresentado na Figura 29.

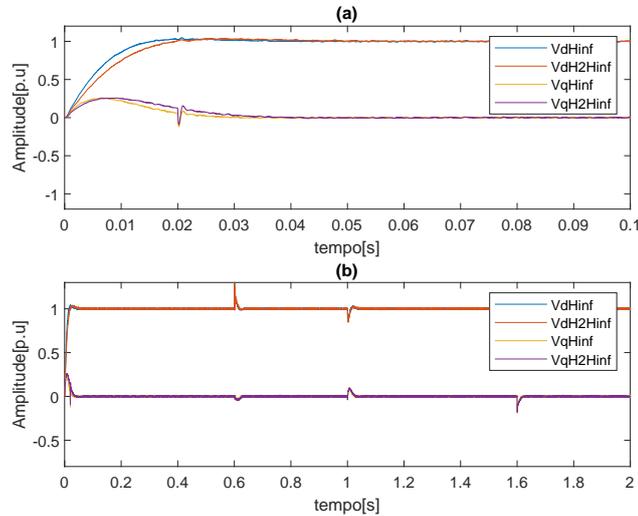
Também se nota que o controlador $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ gera uma resposta com maior amortecimento do sobressinal, ao passo que o \mathcal{H}_∞ apresenta um melhor tempo de assentamento, como mostra a Tabela 8, e também um menor EQM, tal como indicado na Tabela 9.

Tabela 8 – Comparação de desempenho da componente d de tensão utilizando os controladores robustos $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e \mathcal{H}_∞ — Cenário 2.

| | $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ | \mathcal{H}_∞ |
|-------|------------------------------------|----------------------|
| T_s | 0,0097 | 0,0095 |
| MUP | 0,0717 | 0,3640 |

Fonte: Autor.

Figura 29 – Comparação entre as resposta das componentes de tensão d e q sob à carga CA dinâmica e regulada pelos controladores robustos $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e \mathcal{H}_∞ (a) de 0 s até 0,1 s e (b) de 0 s até 2 s — Cenário 2.



Fonte: Autor.

Tabela 9 – Comparação entre os índices EQM das componentes dq de tensão utilizando os controladores robustos $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e \mathcal{H}_∞ — Cenário 2.

| | $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ | \mathcal{H}_∞ |
|---------|------------------------------------|-----------------------|
| EQM_d | 0,9964 | 0,0018 |
| EQM_q | $5,37 \times 10^{-4}$ | $4,24 \times 10^{-4}$ |

Fonte: Autor.

4.5 Conclusões do Capítulo

No capítulo, foram realizadas a modelagem e síntese dos controladores robustos e tradicional. No desenvolvimento dos controladores, os polos foram alocados de forma que as especificações de desempenho desejadas fossem alcançadas.

Foram também realizados alguns testes visando verificar se os requisitos eram atendidos. O controlador convencional mostrou um desempenho adequado até o instante de variação de carga, quando apresentou aspectos instáveis. Analisando o Lugar geométrico das raízes, também verificou-se que, mediante as incerteza dos parâmetros do filtro, a microrrede pode vir a não atender as especificações designadas. Os controladores projetados via LMI que não levaram em conta a incerteza dos parâmetros também alocaram polos em malha fechada fora da região desejada, como era de se esperar. Enquanto que os compensadores, cujos projetos consideraram a incerteza dos parâmetros, atenderam a todas as especificações desejadas, mesmo quando expostos ao cenário de incertezas.

Por fim, fez-se a análise de robustez dos controladores $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e \mathcal{H}_∞ que consideraram incertezas politópicas e verificou-se que suas curvas apresentam comportamento

como esperado, apresentando uma resposta rápida e robusta ao dinamismo da carga. Por fim, destaca-se que, entre todos os compensadores estudados, o controlador \mathcal{H}_∞ apresentou a resposta mais rápida e com menor erro quadrático médio, além de apresentar um sobressinal de 0,2587 %.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, é realizada a síntese de controladores robustos, utilizando LMI, para controle da tensão de uma microrrede operando em modo isolado, considerando como incertezas a carga aplicada e os parâmetros internos do sistema. Nos capítulos 2 e 3 foram apresentados conceitos, abordagens e ferramentas empregadas no controle de microrredes. No capítulo 4, foi feita a modelagem, a síntese dos controladores robustos $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ e \mathcal{H}_∞ e convencional e a comparação e discussão entre os compensadores obtidos pelas diferentes abordagens. Após o projeto, foram investigados alguns cenários, via simulação no *Simulink*, a fim de testar a eficiência dos controladores obtidos sob as condições de incerteza e perturbações do sistema.

Pelas Figuras 15 e 16, constata-se que o sistema usando o controlador convencional não se mostra alinhado com a proposta do presente trabalho. De fato, seus polos ficam alocados fora da região desejada quando submetidos a alguns dos extremos dos intervalo de incertezas apresentados na Tabela 4. Nota-se ainda que o sistema operando em malha fechada apresenta comportamentos não esperados após os momentos de mudança de carga, evidenciando a necessidade do uso de controladores robustos quando o sistema está sujeito a incertezas.

A partir das Figuras 18 a 19, observa-se que apenas os controladores robustos que foram projetados considerando a incerteza dos parâmetros, obtidos em (4.18) e (4.19), alocaram corretamente os polos em malha fechada para qualquer combinação convexa dos vértices do politopo característico.

O controlador $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ apresentou uma resposta rápida e robusta a variações abruptas da carga, como mostrado nas Figuras 22 e 26. E, conforme pode-se observar nas Figuras 27 a 28, a carga é atendida com tensão e corrente com aspecto senoidais e estáveis. Nota-se ainda que a tensão apresenta uma variação percentual da amplitude de 0,2587 % em comparação com o valor nominal, mesmo com a variação da carga.

Vale destacar que de acordo com as Figuras 25 e 29, assim como as Tabelas 7 e 9, o controlador \mathcal{H}_∞ se mostrou mais rápido e com menor valor de EQM.

Por fim, conclui-se que a síntese de controladores robustos via LMIs, considerando a incerteza politópica, se mostrou bem-sucedida. De maneira que foi possível obter controladores que permitam que o sistema possua uma resposta rápida, robusta a perturbações na carga e que se mantenha dentro das especificações de projeto, mesmo mediante incertezas.

5.1 Proposta de Continuidade

Como propostas de continuidade deste trabalho, propõe-se:

-
- O uso de novas técnicas e abordagens de controle robusto aplicados à microrrede operando em modo isolado;
 - Desenvolvimento de controladores robustos fazendo uso variáveis de folga;
 - Uma comparação mais profunda do desempenho entre os controladores robustos obtidos;
 - Inclusão do modelo de barramento CC;
 - Uma comparação com controladores projetados por técnicas de otimização bioinspiradas e;
 - A síntese e a análise de controladores robustos em outros níveis da hierarquia de controle.

Referências

- AGUIAR, F. M. d. Estudo para aplicação de usinas virtuais de energia no brasil. 2022. 14
- ANEEL. *ANEEL fomenta o investimento em inovação no setor elétrico brasileiro*. 2019. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-fomenta-o-investimento-em-inovacao-no-setor-eletrico-brasileiro/656877/pop_up?_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_viewMode=print&_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_languageId=pt_BR. Acesso em: 4 dez. 2021. 13
- ANEEL. *Brasil ultrapassa marca de 10 GW em micro e minigeração distribuída*. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/brasil-ultrapassa-marca-de-10-gw-em-micro-e-minigeracao-distribuida>. Acesso em: 5 abr. 2022. 14
- ARMIN, M. et al. Robust extended h control strategy using linear matrix inequality approach for islanded microgrid. *IEEE access*, IEEE, v. 8, p. 135883–135896, 2020. 17
- ARMIN, M. et al. Lmi-based robust pid controller design for voltage control of islanded microgrid. *Asian Journal of Control*, Wiley Online Library, v. 20, n. 5, p. 2014–2025, 2018. 14, 16
- BABAZADEH, M.; KARIMI, H. μ -synthesis control for an islanded microgrid with structured uncertainties. In: IEEE. *IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.], 2011. p. 3064–3069. 15, 16, 17
- BABAZADEH, M.; KARIMI, H. Robust decentralized control for islanded operation of a microgrid. In: IEEE. *2011 IEEE power and energy society general meeting*. [S.l.], 2011. p. 1–8. 17
- BIDRAM, A.; DAVOUDI, A. Hierarchical structure of microgrids control system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 3, n. 4, p. 1963–1976, 2012. 22, 23, 24
- BONATO, G. Controle misto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ com base em lmis e análise de performance para um pêndulo rotacional invertido. 2017. 36
- BOUZID, A. E. M. et al. Robust three degrees of freedom based on h controller of voltage/current loops for dg unit in micro grids. *IET Power Electronics*, IET, v. 12, n. 6, p. 1413–1424, 2019. 16
- BOYD, S. et al. *Linear matrix inequalities in system and control theory*. [S.l.]: SIAM, 1994. 27
- CARNEIRO, A. V. Projeto, desenvolvimento e implementação de microrrede em campus universitário com tecnologia solar fotovoltaica e de armazenamento. 2017. 20, 21
- CHILALI, M.; GAHINET, P. \mathcal{H}_∞ design with pole placement constraints: an LMI approach. v. 41, n. 3, p. 358–367, mar. 1996. 28

- CHILALI, M.; GAHINET, P.; APKARIAN, P. Robust pole placement in lmi regions. *IEEE transactions on Automatic Control*, IEEE, v. 44, n. 12, p. 2257–2270, 1999. 28
- DELGHAZI, M. B. Advanced islanded-mode control of microgrids. 2011. 19
- DONG, R.; LIU, S.; LIANG, G. Research on control parameters for voltage source inverter output controllers of micro-grids based on the fruit fly optimization algorithm. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 7, p. 1327, 2019. 16, 36
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle modernos*. [S.l.]: Livros Tecnicos e Cientificos, 2001. 26, 39
- DÖHLER, J. Controle em espaço de estados utilizando lqr de conversores para aplicação em microrrede. 2020. 21
- EPE. *PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2022*. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos>>. Acesso em: 5 abr. 2022. 14
- FATHIMA, H. et al. *Hybrid-Renewable Energy Systems in Microgrids: Integration, Developments and Control*. Woodhead Publishing. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2018. 24
- FATHIMA, H. et al. *Hybrid-Renewable Energy Systems in Microgrids: Integration, Developments and Control*. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2018. 20, 21, 22
- FERREIRA, W. M. et al. Controle coordenado de geradores distribuídos em microrredes híbridas ca/cc. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, n. 1. 20
- GAHINET, P. et al. Lmi control toolbox. *The Math Works Inc*, Citeseer, v. 24, 1996. 36
- GONÇALVES, W. J. Geração distribuída: conhecimento das normativas regulatórias. *ARGAMASSA-Revista das Engenharias, Arquitetura e Urbanismo, Geografia, Gestão, Decisão e Memória*, n. 001, p. 34–66, 2018. 14
- HAN, Y. *Microgrid optimization, modelling and control*. Tese (Doutorado) — Colorado State University, 2014. 19
- IOINOVICI, A.; HOROWITZ, I. Algorithm for the design of multi-input filters with parameter uncertainty. *International Journal of Electronics Theoretical and Experimental*, Taylor & Francis, v. 59, n. 4, p. 449–460, 1985. 15
- KABALCI, E. *Multilevel Inverters: Control Methods and Advanced Power Electronic Applications*. [S.l.]: Academic Press, 2021. 24
- KHAN, M. Robust control of a microgrid. Unpublished, 2016. Disponível em: <<http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.18411.16167>>. 19
- KOCH, G. G. et al. Linear matrix inequality based synthesis of pi controllers for pmsm with uncertain parameters. *Eletrônica de potência= Brazilian journal of power electronics*, Associação Brasileira de Eletrônica de Potência, 2018. 28, 29, 30
- LEITE, V. J. et al. Estabilidade robusta de sistemas lineares através de desigualdades matriciais lineares. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática*, SciELO Brasil, v. 15, p. 24–40, 2004. 29

- LÖFBERG, J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In: . Taipei, Taiwan: [s.n.], 2004. p. 284–289. <<http://yalmip.github.io>>. 42
- MOHAMMADI, F. et al. Robust control strategies for microgrids: A review. *IEEE Systems Journal*, IEEE, 2021. 16, 23, 24
- NACIONAL, I. *Lei N^o 14.300, de 6 de janeiro de 2022 - dou - Imprensa Nacional*. 2022. Disponível em: <<https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14-300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>>. Acesso em: 5 abr. 2022. 14
- NISE, N. S. Control systems engineering 6 th edition. *New York*, 2011. 26, 27, 40
- NSHUTI, H. *Centralized and Decentralize Control of Microgrids*. Tese (Doutorado) — University of Vaasa, 2022. 22, 23, 24
- OGATA, K. *Engenharia de Controle moderno*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2011. 26
- ÖLÇER, T. U. *H/H mixed robust controller synthesis for a fin actuation system*. Dissertação (Mestrado) — Middle East Technical University, 2013. 35, 42
- OLIVEIRA, B. J. d. Estimação de estados de um sistema térmico por meio de filtragem via lmis. 2019. 15
- PATHAN, E. et al. Robust frequency controller based on linear matrix inequality for parallel islanded microgrid. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 10, n. 5, p. 6264–6269, 2020. 15
- PEAUCELLE, D. et al. A new robust d-stability condition for real convex polytopic uncertainty. *Systems & control letters*, Elsevier, v. 40, n. 1, p. 21–30, 2000. 28
- PEREIRA, L. F. A. et al. Multiple resonant controllers for uninterruptible power supplies—a systematic robust control design approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 61, n. 3, p. 1528–1538, 2013. 36, 37
- PURCHALA, K. et al. Distributed generation and the grid integration issues. *KULeuven, Imperial College London*, Citeseer, p. 9, 2006. 19
- QUAN, X. et al. A novel dominant dynamic elimination control for voltage-controlled inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 65, n. 8, p. 6800–6812, 2018. 38
- RAMEZANI, M.; LI, S.; GOLESTAN, S. Analysis and controller design for stand-alone vsis in synchronous reference frame. *IET Power Electronics*, IET, v. 10, n. 9, p. 1003–1012, 2017. 38, 39, 40
- SANTOS, J. T. Controle robusto via lmi aplicado ao amortecimento ativo de vibração em um modelo de estrutura com dois andares. 2018. 27
- SANTOS, L. L. C. d. et al. Metodologia para análise da tarifa branca e da geração distribuída de pequeno porte nos consumidores residenciais de baixa tensão. Universidade Federal de Santa Maria, 2014. 19
- SANTOS, R. *Gerenciamento de potência de uma microrrede híbrida CA/CC utilizando controle baseado em potência*. Tese (Doutorado) — UFMG, 2019. 13, 19, 21, 22, 24

- SEDGHI, L. et al. Decentralized control of an islanded microgrid based on offline model reference adaptive control. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, AIP Publishing LLC, v. 10, n. 6, p. 065301, 2018. 16
- SEDGHI, L.; FAKHARIAN, A. Robust voltage regulation in islanded microgrids: A lmi based mixed h₂/h_∞ control approach. In: IEEE. *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. [S.l.], 2016. p. 431–436. 14, 16, 17, 25, 38
- SEDGHI, L.; FAKHARIAN, A. Voltage and frequency control of an islanded microgrid through robust control method and fuzzy droop technique. In: IEEE. *2017 5th Iranian joint congress on fuzzy and intelligent systems (CFIS)*. [S.l.], 2017. p. 110–115. 32
- SEDHOM, B. E. et al. Robust adaptive h-infinity based controller for islanded microgrid supplying non-linear and unbalanced loads. *IET Smart Grid*, IET, v. 2, n. 3, p. 420–435, 2019. 17
- SHABESTARI, P. M.; MEHRIZI-SANI, A. Transient behaviour verification and controller tuning for an uncertain grid-connected photovoltaic system using reachability analysis. 2021. 15
- SIMAS, M. S. *Energia eólica e desenvolvimento sustentável no Brasil: estimativa da geração de empregos por meio de uma matriz insumo-produto ampliada*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012. 14
- SMITH, C.; CORRIPIO, A. *Princípios E Prática Do Controle Automático de Processo*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2008. 38
- STURM, J. F. Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones. v. 11, n. 1–4, p. 625–653, 1999. <<http://sedumi.ie.lehigh.edu/>>. 42
- SWISHER, J. N.; JANNUZZI, G. d. M.; REDLINGER, R. Y. *Tools and methods for integrated resource planning. Improving energy efficiency and protecting the environment*. [S.l.], 1997. 13
- TOLIYAT, A. et al. *Energy storage sizing for low-inertia microgrids, and lessons learned from a potential microgrid*. Tese (Doutorado), 2016. 15
- VIEIRA, D.; CASTRO, M. *Cadernos Temáticos ANEEL-Micro e Minigeração Distribuída*. [S.l.]: ANEEL, 2016. 19
- YANG, R.; ROTONDO, D.; PUIG, V. D-stable controller design for lipschitz nlpv system. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 52, n. 28, p. 88–93, 2019. 28