

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

FELIPE ALBRECHT FITARELLI - 00303398

**APLICAÇÃO DO MÉTODO VRFT PARA O  
CONTROLE DE UMA USINA VIRTUAL DE  
ENERGIA**

Porto Alegre  
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

FELIPE ALBRECHT FITARELLI - 00303398

**APLICAÇÃO DO MÉTODO VRFT PARA O  
CONTROLE DE UMA USINA VIRTUAL DE  
ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
COMGRAD/CCA da UFRGS como parte dos requi-  
sitos para a obtenção do título de *Bacharel em Enge-  
nharia de Controle e Automação*.

Orientadores:

Profa. Dra. Lucíola Campestrini

Profa. Dra. Mariana Resener

Porto Alegre  
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

FELIPE ALBRECHT FITARELLI - 00303398

**APLICAÇÃO DO MÉTODO VRFT PARA O  
CONTROLE DE UMA USINA VIRTUAL DE  
ENERGIA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Atividade de *Trabalho de Conclusão de Curso CCA - II* e aprovado em sua forma final pelos Orientadores e Banca Examinadora abaixo.

Orientadores:

Profa. Dra. Lucíola Campestrini, UFRGS  
Doutora pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Profa. Dra. Mariana Resener, SFU  
Doutora pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Lucíola Campestrini, UFRGS  
Doutora pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos, UFRGS  
Doutor pela UFSC – Florianópolis, Brasil

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores, UFRGS  
Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

---

Alceu Heinke Frigeri  
Coordenador de Curso  
Eng. de Controle e Automação

Porto Alegre  
Janeiro - 2025

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à Luna, minha eterna companheira de quatro patas.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha orientadora, Lucíola Campestrini, e coorientadora, Mariana Resener, por todo o apoio (e diversas reuniões) na realização deste trabalho.

Agradeço ao Jonathan LeSage por responder ao meu *e-mail* e fornecer o modelo WECC de planta fotovoltaica, implementado no Simulink®, utilizado no trabalho. Também expressei minha gratidão ao Maicon Ramos, por esclarecer dúvidas quanto ao uso de tal modelo.

## RESUMO

Este trabalho propõe uma aplicação de métodos de controle baseado em dados, com ênfase na aplicação do *Virtual Reference Feedback Tuning* (VRFT), em usinas virtuais de energia, contextualizado pela crescente busca por um aumento do uso de fontes renováveis na matriz elétrica global. As usinas virtuais de energia são sistemas que integram múltiplos recursos energéticos distribuídos (como geradores eólicos e solares) atuando de forma coordenada e descentralizada, por meio de um sistema de controle, para otimizar a geração e distribuição de energia – principalmente para a prestação de serviços ancilares e/ou requisitos de mercado. O controle dessas usinas envolve diversas malhas, em ramos paralelos, que levam a variável controlada a um valor de interesse. Neste trabalho, técnicas de controle baseado em dados, por oferecerem a vantagem de ajuste dos controladores sem a necessidade de um conhecimento completo dos processos, são aplicadas ao controle da potência ativa de uma usina virtual de energia. Dessa forma, são propostas duas metodologias para as sintonias dos controladores, pelo VRFT, em ramos paralelos: a Sintonia Sequencial e a Sintonia Matricial Conjunta. Por meio de simulações de uma usina virtual formada por quatro plantas solares fotovoltaicas, baseadas no modelo genérico WECC, as metodologias propostas demonstraram sua eficácia ao atenderem às diretrizes dos projetos. Contudo, observaram-se limitações no desempenho da resposta de potência ativa em cenários que incluíram a excitação de não linearidades e desconexão das plantas.

**Palavras-chave:** Controle baseado em dados, Potência ativa, VPP, VRFT

## ABSTRACT

This work proposes an application of data-driven control methods, with an emphasis on the application of Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT), in virtual power plants, contextualized by the growing demand for an increase in the use of renewable sources in the global energy matrix. Virtual power plants are systems that integrate multiple distributed energy resources (such as wind and solar generators) operating in a coordinated and decentralized manner, through a control system, to optimize energy generation and distribution – primarily for providing ancillary services and/or meeting market requirements. The control of these plants involves several loops, in parallel branches, that bring the controlled variable to a desired value. In this work, data-driven control techniques, which offer the advantage of tuning controllers without requiring complete knowledge of the processes, are applied to control the active power of a virtual power plant. Thus, two methodologies are proposed for controller tuning using VRFT in parallel branches: Sequential Tuning and Joint Matrix Tuning. Through simulations of a virtual power plant composed of four photovoltaic solar plants, based on the generic WECC model, the proposed methodologies demonstrated their effectiveness in meeting design guidelines. However, limitations in the performance of active power response were observed in scenarios that included the excitation of nonlinearities and disconnection of the plants.

**Palavras-chave:** Active power, Data-driven control, VPP, VRFT

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Diagrama de blocos do sistema modular para a VPP.....	19
2	Diagrama de blocos da estrutura de controle.....	20
3	Diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada. ....	22
4	Diagrama de blocos da malha fechada para o projeto, em que as linhas tracejadas representam os dados virtuais. ....	23
5	Diagrama de blocos para o sistema de controle em malha fechada com dois ramos.....	27
6	Diagrama de blocos da malha única de aplicação do método VRFT. . .	27
7	Resultados da simulação da $G_1(z)$ em malha fechada com o controlador $C_1(z, \hat{\rho}_1)$ projetado.....	30
8	Resultados da simulação do controlador $C_2(z, \hat{\rho}_2)$ projetado em malha fechada com $G_2(z)$ e para o sistema completo.....	31
9	Diagrama de blocos para o sistema de controle em malha fechada com $n$ ramos.....	32
10	Resultados da simulação para o sistema completo com os controladores $C_1(z, \hat{\rho}_1)$ , $C_2(z, \hat{\rho}_2)$ e $C_3(z, \hat{\rho}_3)$ definidos. ....	35
11	Diagrama de blocos do modelo para sistema fotovoltaico genérico. ....	37
12	Modelo para sistema fotovoltaico genérico implementado no Simulink®.	37
13	Sistema da usina virtual de energia implementado no Simulink®. ....	39
14	Diagrama de blocos do controle de potência ativa no sistema fotovoltaico genérico. ....	41
15	Resultados da simulação da VPP (com as três plantas), com controle interno linear, em malha fechada – sintonizada matricialmente – para referências de saltos com três amplitudes diferentes. ....	42
16	Resultados da simulação dos sinais de controle internos das três plantas, considerando o controle interno linear, para referências de saltos na VPP com três amplitudes diferentes.....	43
17	Resultados da simulação da VPP (com as três plantas), com controle interno não linear, em malha fechada – sintonizada matricialmente – para referências de saltos com três amplitudes diferentes. ....	44
18	Resultados da simulação dos sinais de controle internos das três plantas, considerando o controle interno não linear, para referências de saltos na VPP com três amplitudes diferentes. ....	45
19	Resultados da simulação das potências ativas de cada planta fotovoltaica, com controle interno não linear, para referências de saltos com três amplitudes diferentes.....	46

20	Resultados da simulação da VPP (com as três plantas), com controle interno não linear e modelo de referência de segunda ordem para a usina, em malha fechada – sintonizada matricialmente – para referências de saltos com três amplitudes diferentes. ....	47
21	Resultados da simulação dos sinais de controle internos das três plantas, considerando o controle interno não linear e modelo de referência de segunda ordem para a usina, para referências de saltos na VPP com três amplitudes diferentes.....	48
22	Resultados da simulação da VPP (com as quatro plantas) em malha fechada – sintonizada sequencialmente – para referências de saltos com três amplitudes diferentes. ....	49
23	Resultados da simulação da VPP (com as quatro plantas) em malha fechada – sintonizada sequencialmente – para referência de salto de 741 kW.....	49
24	Resultados da simulação dos sinais de controle internos das quatro plantas para referência de salto de 741 kW.....	50
25	Resultados da simulação da VPP em malha fechada, para referências de saltos com três amplitudes diferentes, com desconexão da planta 1. ...	51
26	Resultados da simulação da VPP em malha fechada, para referências de saltos com três amplitudes diferentes, utilizando controladores dos tipos PID e P. ....	52
27	Resultados da simulação da VPP em malha fechada com desconexão da planta 1, para referências de saltos com três amplitudes diferentes, utilizando controladores dos tipos PID e P.....	53
28	Equivalente de Thévenin da rede para a conexão com a VPP.....	61
29	Resultados dos ensaios das quatro plantas, considerando o controle interno linear, para referências de saltos com amplitude de 20% das respectivas potências nominais.....	62
30	Resultados dos ensaios das quatro plantas, considerando o controle interno não linear, para referências de saltos com amplitude de 20% das respectivas potências nominais.....	63

## LISTA DE TABELAS

1	Parâmetros de interesse do sistema da VPP.....	40
2	Parâmetros alterados das plantas fotovoltaicas para o controle interno linear. ....	41
3	Parâmetros alterados das plantas fotovoltaicas para o controle interno não linear. ....	43
4	Parâmetros das plantas fotovoltaicas.....	60

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
2	USINAS VIRTUAIS DE ENERGIA .....	15
2.1	Composição .....	16
2.2	Classificação.....	16
2.2.1	Usina Virtual Técnica de Energia (TVPP) .....	16
2.2.2	Usina Virtual Comercial de Energia (CVPP) .....	17
2.2.3	Usina Virtual Dinâmica de Energia (DVPP).....	17
2.3	Controle e Otimização .....	17
2.3.1	Tipos de Controle .....	17
2.3.2	Casos de Estudo .....	18
3	CONTROLE BASEADO EM DADOS.....	21
3.1	Controle por Modelo de Referência.....	22
3.2	Método da Referência Virtual (VRFT) .....	23
4	VRFT PARA MALHA DE CONTROLE COM LAÇOS PARALE- LOS .....	26
4.1	Sintonia Sequencial.....	26
4.1.1	Validação da Sintonia Sequencial Ideal .....	29
4.2	Sintonia Matricial Conjunta .....	31
4.2.1	Validação da Sintonia Matricial Conjunta Ideal .....	34
5	MODELAGEM E CONTROLE DE UMA USINA VIRTUAL DE ENERGIA.....	36
5.1	Sistema Fotovoltaico Genérico.....	36
5.1.1	Ordem dos Modelos de Plantas Fotovoltaicas .....	38
5.2	Modelo da Usina Virtual de Energia .....	38
5.3	Controle da Usina Virtual de Energia .....	38
5.3.1	Projeto e Simulação com a Sintonia Matricial Conjunta .....	39
5.3.1.1	Plantas Fotovoltaicas com Controle Interno Linear de Potência Ativa .	41
5.3.1.2	Plantas Fotovoltaicas com Controle Interno Não Linear de Potência Ativa	42
5.3.1.3	Modelo de Referência de Segunda Ordem .....	45
5.3.2	Projeto e Simulação com a Sintonia Sequencial .....	47
5.3.3	Projeto e Simulação com Outras Estruturas de Controladores.....	50

6	CONCLUSÃO .....	54
	REFERÊNCIAS .....	56
	APÊNDICES .....	59
	APÊNDICE A - PARÂMETROS E CONFIGURAÇÕES DE CONTROLE DAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS .....	60
	APÊNDICE B - EQUIVALENTE DO SISTEMA ELÉTRICO.....	61
	APÊNDICE C - ENSAIOS COM AS PLANTAS FOTOVOLTAICAS .....	62
C.1	Ensaio com Plantas Fotovoltaicas com Controle Interno Linear.....	62
C.2	Ensaio com Plantas Fotovoltaicas com Controle Interno Não Linear...	63

# 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o cenário mundial de produção de energia tem passado por mudanças com o intuito de aumentar o uso de fontes renováveis que garantam uma geração sustentável, eficiente e estável – e, conseqüentemente, atenuem os efeitos das mudanças climáticas. Em 2021, apenas 28,1% da produção da matriz elétrica mundial era composta por fontes renováveis. Por outro lado, a matriz elétrica brasileira totalizou 84,8% de sua produção por meio dessas fontes neste mesmo ano (PESQUISA ENERGÉTICA, 2023), especialmente devido à produção hidráulica favorecida pela geografia do país.

Nesse contexto, o setor de energia elétrica tem sido impulsionado por três fatores principais (SIMONE, 2019): descentralização, descarbonização e digitalização. O avanço da tecnologia dos equipamentos e sistemas de comunicação possibilita que dispositivos elétricos e medidores inteligentes estabeleçam uma rede bidirecional entre os consumidores e operadores, o que resulta no aprimoramento da segurança e qualidade do fornecimento de energia elétrica (FERNANDES, 2022). Desta forma, o estudo sobre as usinas virtuais de energia tem ganhado espaço em pesquisas como solução para a gestão de recursos energéticos.

Uma usina virtual de energia, do inglês *Virtual Power Plant* (VPP), é formada por um conjunto de recursos energéticos distribuídos, responsável por entrelaçar múltiplas fontes de energia – como geradores eólicos ou solares, sistemas de armazenamento e até termelétricas. O propósito desses recursos é operar de forma conjunta como uma planta de energia convencional, por meio de um sistema de controle que coordena o fluxo de energia, conforme a necessidade do sistema ou estratégias de mercado (AGUIAR, 2022).

A otimização dos pontos de operação dos equipamentos e metodologias para o controle dessas usinas é tema de diversos trabalhos. Em Häberle et al. (2022), o controle do sistema é feito por meio de compensadores locais, com variação de parâmetros lineares (do inglês *Linear Parameter-Varying* – LPV), ajustados a partir de matrizes de participação dinâmicas. Já em Elkhatib, Johnson e Schoenwald (2017), a sintonia de controladores do tipo proporcional-integral-derivativo é abordada a partir da utilização do método de Ziegler-Nichols; esse método não necessita do modelo da planta, no entanto, é heurístico e a sintonia nem sempre é eficaz. O estudo de Rouzbahani, Karimipour e Lei (2021), por outro lado, sugere a possibilidade de solucionar o problema usando métodos com base no aprendizado de máquina.

Dentre as técnicas para a sintonia dos compensadores de processos usualmente utilizadas, há os métodos de controle baseado em dados (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012). Esses oferecem uma vantagem para ajustar os controladores em relação aos da teoria clássica de controle: o conhecimento das equações das plantas em que atuarão não é essencial. A sintonia é feita por meio da minimização de uma função custo definida por cada método, com base em um objetivo de controle desejado e um conjunto de dados coletado em um ensaio, que resulta na obtenção dos parâmetros para o controlador projetado. Assim sendo, são vantajosos para a aplicação em usinas virtuais de energia,

uma vez que as mesmas são compostas por diversos equipamentos e, muitas vezes, o equacionamento torna-se complexo e inclui diversas malhas de controle. Em Li, Wu e Lin (2022) são utilizadas essas técnicas para o controle de uma rede composta por múltiplas VPPs, no entanto, aplicam-se métodos recursivos e outros algoritmos de otimização para melhorar a taxa de convergência da metodologia proposta.

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo sobre as usinas virtuais de energia e do método de controle baseado em dados, não iterativo, *Virtual Reference Feedback Tuning* (VRFT) com o intuito de realizar o controle de potência ativa de uma VPP, baseada na estrutura de Elkhatib, Johnson e Schoenwald (2017). Mais especificamente, propõem-se, também, duas metodologias para a sintonia de compensadores em ramos paralelos: Sintonia Sequencial e Sintonia Matricial Conjunta. Assim, ao utilizar os métodos baseados em dados, apenas ensaios com os processos e a definição de um desempenho desejado são essenciais para a sintonização dos controladores, ou seja, não há a necessidade da determinação de modelos matemáticos explícitos para os recursos energéticos distribuídos.

Esse trabalho possui a seguinte organização: o Capítulo 2 traz os conceitos fundamentais e definição das usinas virtuais de energia, além de uma revisão da literatura sobre o controle desses sistemas. No Capítulo 3 são apresentadas as técnicas de controle baseado em dados, mais especificamente o VRFT. Já no Capítulo 4 são tratadas as abordagens da sintonização de controladores em laços paralelos de um sistema em malha fechada por meio da utilização sequencial e matricial conjunta do VRFT. A exposição do modelo utilizado para as plantas fotovoltaicas e a modelagem da usina virtual de energia é tema do Capítulo 5. Também são realizados os projetos dos compensadores, para três cenários diferentes, e a aplicação desses na usina virtual de energia, além de analisar os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 6 traz a conclusão e a perspectiva para trabalhos futuros.

## 2 USINAS VIRTUAIS DE ENERGIA

A crescente busca mundial para a utilização de energia renovável em maior escala, como uma das vias para reduzir os impactos ambientais, tem se dado por meio dos Recursos Distribuídos de Energia, do inglês *Distributed Energy Resources* (DERs). Os DERs, de acordo com Aguiar (2022), podem ser definidos como um conjunto de tecnologias de geração e/ou armazenamento de energia elétrica, incluindo geração distribuída, resposta à demanda, sistemas de armazenamento, eficiência energética e veículos elétricos. Esses propiciam que o consumidor, que pode ser chamado de “*prosumidor*”, tenha um papel ativo na geração, armazenamento e gerenciamento da sua energia elétrica (SIMONE, 2019; AGUIAR, 2022).

Apesar de ser um conceito recente e ainda não definitivo, as literaturas definem uma Usina Virtual de Energia como uma estrutura de rede interconectada e descentralizada de múltiplos DERs atuando, em consonância, com objetivos de otimização de eficiência e controle para a prestação de serviços ancilares e/ou requisitos de mercado (AGUIAR, 2022; ROUZBAHANI; KARIMIPOUR; LEI, 2021; ELKHATIB; JOHNSON; SCHOENWALD, 2017). A principal ideia é combinar várias unidades de geração distribuída, por meio de um sistema de comunicação bidirecional em tempo real (ROUZBAHANI; KARIMIPOUR; LEI, 2021), com o intuito de formar uma “unidade geradora virtual única” e equivalente a uma convencional, mas capaz de ser visível ou gerenciável individualmente (SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011).

As aplicações de VPPs são parte dos estudos de Nascimento (2023) e Aguiar (2022), onde é possível observar que países como a Alemanha, os Estados Unidos e a Austrália estão na vanguarda no uso desta tecnologia e desenvolvimento do seu modelo de negócio. A Alemanha possui, atualmente, uma das maiores usinas virtuais de energia do mundo operada pela empresa norueguesa Statkraft, totalizando mais de 1500 unidades geradoras com despacho centralizado.

Já na Austrália, a *Australian Energy Market Operator* (AEMO) – agente responsável pela operação dos sistemas de transmissão e dos mercados de venda de energia – realizou a “*AEMO’s Virtual Power Plant Demonstration*” para entender as mudanças regulatórias e a integração dos DERs no mercado nacional de eletricidade. Ainda, empresas como AGL e Tesla também lançaram um projeto piloto baseados em energia solar e armazenamento em baterias, em que os usuários recebem descontos em suas faturas por despacharem energia em momentos críticos da rede (AGUIAR, 2022; NASCIMENTO, 2023).

Nos Estados Unidos, o estado da Califórnia aprovou, em julho de 2023, um programa estatal para adoção de VPPs em que se utilizará milhares de baterias distribuídas, carregadas por energia solar, e baterias alimentadas pela rede (*standalone batteries*), situadas em residências e empresas em todo o estado. Essa concepção de VPP tem como objetivo de atender às crescentes necessidades de eletricidade, especialmente durante picos de demanda, quando a rede está mais sobrecarregada e os preços da energia elevados (NASCIMENTO, 2023).

## 2.1 COMPOSIÇÃO

Com base no estudo de Saboori, Mohammadi e Taghe (2011), uma VPP é usualmente integrada por três ramos principais: tecnologia de geração, tecnologia de armazenamento de energia e tecnologia de comunicação e informação. Esses especificam, principalmente, as funções que os equipamentos empregados desempenham e a maneira com que se comunicam, além da definição dos objetivos de controle e otimização dos pontos de operação.

As tecnologias de geração englobam os equipamentos capazes de produzir a energia do sistema. Esses podem ser renováveis – como geradores eólicos, painéis fotovoltaicos, pequenas hidrelétricas, usinas de biomassa e biogás – e não renováveis – que incluem geradores a diesel e turbinas a gás (SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011; FERNANDES, 2022).

As VPPs devem incluir majoritariamente cargas que possam ser controláveis e despacháveis<sup>1</sup> (FERNANDES, 2022). Dessa forma, sistemas de armazenamento de energia fornecem para as usinas virtuais um meio de adaptação às variações da produção e consumo, servindo como *buffers* de energia para o caso de fontes de geração intermitentes (SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011). Logo, quando combinada com um banco de baterias, a geração por meio de recursos renováveis é capaz de responder como um recurso despachável, por exemplo.

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO

As usinas virtuais de energia podem ser categorizadas em duas classes principais: a técnica (TVPP) – com foco no desempenho do sistema – e a comercial (CVPP) – que se fundamenta no lucro econômico. Apesar de existirem outras divisões apresentadas na literatura, elas recaem dentro dessas duas principais (ROUZBAHANI; KARIMIPOUR; LEI, 2021). No entanto, será apresentada também a VPP dinâmica (DVPP), que está enquadrada principalmente na TVPP, uma vez que com a metodologia de controle que será descrita neste trabalho tem-se a possibilidade de atender a requisitos especificados por tal subclasse.

### 2.2.1 Usina Virtual Técnica de Energia (TVPP)

A TVPP, que é a sigla de *Technical Virtual Power Plant*, é responsável por garantir o desempenho técnico da rede de energia, com a finalidade de se ter uma operação controlável, segura, confiável e estável (ROUZBAHANI; KARIMIPOUR; LEI, 2021). A restrição, no entanto, é que todos os DERs devem ser da mesma região geográfica (SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011; AGUIAR, 2022; FERNANDES, 2022).

A principal atuação da usina técnica é por meio da prestação de serviços ancilares (SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011; FERNANDES, 2022), isto é, serviços que realizam o controle de frequência, controle de tensão, gerenciamento de demanda, operação ilhada, restauração da rede e atuam em situações emergenciais de forma a contribuir com a confiabilidade da transmissão de energia. A TVPP requer conhecimento detalhado da rede local para a obtenção de resultados precisos que possam servir de base para a gestão da operação e balanceamento (FERNANDES, 2022) – que reduz, conseqüentemente, a indisponibilidade do sistema.

---

<sup>1</sup>Fontes de energia que podem ser ajustadas sob demanda pelos operadores da rede.

## 2.2.2 Usina Virtual Comercial de Energia (CVPP)

A CVPP, do inglês *Commercial Virtual Power Plant*, é caracterizada por um perfil agregado de DERs, que representam um portfólio, capaz de competir no mercado de energia da mesma forma que as usinas tradicionais conectadas ao sistema de transmissão (FERNANDES, 2022). Ela se diferencia em relação à TVPP por poder atuar além da sua região geográfica, ou seja, não está limitada a uma área elétrica. Para Saboori, Mohammadi e Taghe (2011) e Aguiar (2022), a otimização da produção baseada no potencial de geração e na previsão de demanda de consumidores é a finalidade dessa modalidade.

## 2.2.3 Usina Virtual Dinâmica de Energia (DVPP)

O conceito de usina virtual dinâmica de energia (DVPP, do inglês *Dynamic Virtual Power Plant*) foi inicialmente proposto em Marinescu et al. (2022) com o escopo de integrar os aspectos dinâmicos dos níveis local (com respeito aos DERs), de rede (serviços ancilares) e econômico (participação no mercado). Ela consiste de um conjunto de DERs despacháveis e não despacháveis escolhidas com o intuito, principalmente, de garantir o desempenho dinâmico dos serviços ancilares, incluindo o controle rápido de frequência e de tensão. Uma vez que as VPPs convencionais não estão preocupadas com serviços ancilares rápidos, aspectos geográficos ou restrições dinâmicas (MARINESCU et al., 2022), a proposição de DVPPs garante a inclusão tanto da dinâmica dos equipamentos do sistema quanto da rede elétrica.

## 2.3 CONTROLE E OTIMIZAÇÃO

Nesta seção serão apresentadas as três principais categorias de arranjo de controle e do tipo de agregação – controle direto, controle hierárquico e controle distribuído. Além disso, uma seleção de casos de estudo, sobre aplicação de técnicas de controle e determinação dos pontos de operação para os DERs das usinas virtuais, será abordada para fins de contextualização do estado da arte em tal assunto. Por fim, uma subseção específica tratará sobre o artigo de controle e otimização de VPPs que serviu como inspiração e base para o presente trabalho.

### 2.3.1 Tipos de Controle

Com base nos estudos de Raab et al. (2011) e Aguiar (2022), existem três classificações para os arranjos de controle:

1. Controle Direto: o centro de controle é responsável por decidir, otimizar e comunicar diretamente com cada DER ou entidade da VPP acerca das requisições e pontos de operação. No entanto, as limitações de cada equipamento definem como cada recurso responderá a tais solicitações;
2. Controle Hierárquico: camadas adicionais de funções de agregação são consideradas, ou seja, existem módulos hierárquicos responsáveis por elaborar estratégias e determinar os pontos de operação que são enviados como entradas para o centro de controle;

3. Controle Distribuído: o centro de controle não possui acesso direto à operação do DER, fazendo com que cada entidade tenha que definir seus pontos ótimos de operação; isso implica, desta forma, na necessidade dos equipamentos terem recursos computacionais adequados para determinarem seus objetivos.

### 2.3.2 Casos de Estudo

O artigo de Rouzbahani, Karimipour e Lei (2021) tem como foco a “programação ótima” (do inglês *optimal scheduling*) dos recursos das VPPs, uma vez que define como sendo o tópico crucial para os estudos de gerenciamento energético. Assim sendo, aborda os métodos que podem ser utilizados para calcular os pontos ideais de operação – esses sendo, por exemplo, a programação linear, programação inteira e programação inteira mista – com o objetivo de maximizar o lucro enquanto minimiza as perdas e o custo. Também aborda a possibilidade de implementar métodos com base no aprendizado de máquina – como aprendizagem profunda e por reforço, aprendizado supervisionado e não supervisionado e redes neurais convolucionais – para lidar com problemas complexos contendo diversas restrições. Por fim, propõe a utilização de um sistema baseado em *blockchain*<sup>2</sup>, para garantir segurança e privacidade, aliado a uma programação com aprendizado por reforço profundo (*Deep Reinforcement Learning*), que é capaz de abordar as restrições e incertezas ao mesmo tempo em diferentes níveis de tensão, ambientes e escalas de rede.

O controle multivariável, com o objetivo de prover um desempenho desejado para os serviços ancilares dinâmicos (como controle rápido de tensão e de frequência), para uma DVPP é apresentado em Häberle et al. (2022). As especificações de controle de frequência e tensão são desagregadas por meio de matrizes de participação dinâmica adaptativas para obter o comportamento local desejado para cada dispositivo. Em seguida, é realizado o projeto dos controladores locais com parâmetros lineares variantes no tempo (ou LPV, do inglês *Linear Parameter-Varying*) para tais especificações, considerando os limites físicos e determinados para cada dispositivo. Os compensadores obtidos são testados numericamente no IEEE 9-Bus System (que contém duas usinas termelétricas convencionais e uma usina hidrelétrica) e comprovam a eficácia do método elaborado.

Em Li, Wu e Lin (2022) é proposto um método de controle volt/var robusto, distribuído e baseado em dados para redes que incluem múltiplas VPPs; assim sendo, não depende de nenhum conhecimento prévio dos parâmetros do modelo do sistema e é robusto a dados incorretos. Por ser um sistema com múltiplas VPPs, cada uma obtém continuamente os dados do próprio sistema local, para corrigir estratégias de controle, e trocam apenas informações limitadas entre si. Para isso, é utilizado o método de regressão de mínimos quadrados recursivos de otimização hierárquica para aproximar a resposta de entrada-saída do sistema em tempo real com base na observação parcial da rede. Ainda, o trabalho utiliza o método ADMM (do inglês *Alternating Direction Method of Multipliers*) para implementar uma otimização baseada em dados, em consonância com o método do gradiente acelerado de Nesterov, responsável por melhorar a taxa de convergência do método proposto sem aumentar a carga computacional. Os testes numéricos realizados mostram um desempenho promissor da metodologia proposta, mesmo na presença de dados imprecisos nas medições.

---

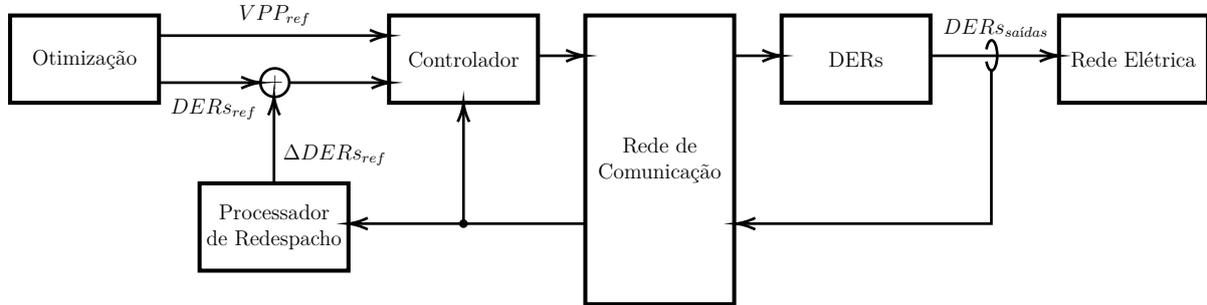
<sup>2</sup>*Blockchain* é uma rede descentralizada ou um registro distribuído que fornece um mecanismo seguro em que a maioria dos participantes deve verificar cada registro antes de armazenar informações de um novo ativo (ROUZBAHANI; KARIMIPOUR; LEI, 2021).

A elaboração de uma arquitetura de otimização em tempo real para as DERs, por meio da coleta de medições de tensão e potência pertinentes, que formam uma VPP é tema do trabalho de Dall’Anese et al. (2018). O objetivo é ajustar a potência de saída de cada dispositivo, por meio de controladores, em resposta a um ponto de operação desejado para um especificado local de leitura da rede; esse processo regula simultaneamente as tensões internas do sistema e maximiza os objetivos de desempenho dos clientes e da concessionária. O algoritmo é desenvolvido com base em métodos *on-line* de *primal-dual-gradient* aplicados a funções Lagrangianas duplamente suavizadas – enquanto utiliza aproximações lineares adequadas das equações de fluxo de potência para corrente alternada, com intuito de contornar as não linearidades. Os resultados numéricos mostram que o método proposto é resiliente a DERs de resposta lenta e garante precisão de rastreamento mesmo quando a dinâmica dos inversores é da ordem de segundos.

### Artigo Base

O projeto de controladores de realimentação para atender ao mercado de energia é apresentado em Elkhatib, Johnson e Schoenwald (2017): o objetivo do sistema de controle da VPP é garantir que a produção total de potência, em tempo real, seja mantida dentro de uma margem de erro aceitável, com qualidade, estabilidade e segurança. Para isso, o artigo emprega um modelo modular para representar a VPP, que pode ser visto na Figura 1, em que cada bloco possui uma funcionalidade específica.

**Figura 1:** Diagrama de blocos do sistema modular para a VPP.



Fonte: adaptado de Elkhatib, Johnson e Schoenwald (2017)

O bloco de otimização utiliza de previsões de longo (entre 24 a 60 horas) e curto prazo (até 12 horas) da potência, baseado em informações de mercado, disponibilidade, consumo e meteorologia, para determinar os pontos de operação dos DERs e, também, alterar seus horários de funcionamento. Ainda, a referência de potência total é estipulada. Já o bloco de redespacho tem como função a atualização, em tempo real, das referências enviadas aos dispositivos para garantir que a saída da VPP seja restaurada – uma vez que desvios podem ocorrer, por conta de falhas ou condições do ambiente, e impactam o desempenho. Assim, é implementado o seguinte cálculo, que inclui casos de contingência, para um conjunto de  $N$  DERs:

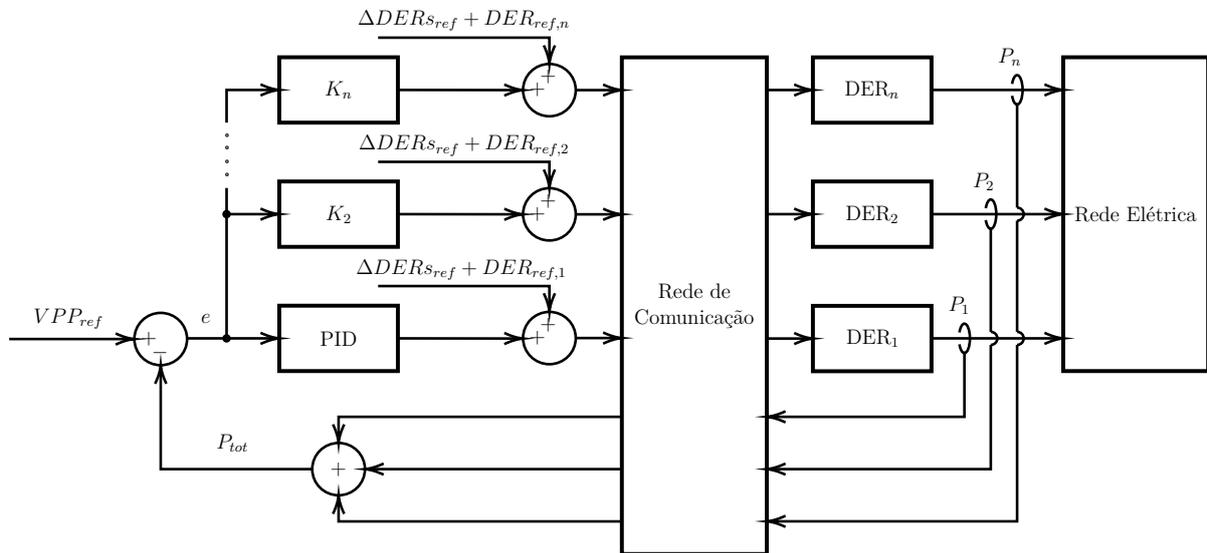
$$\Delta P_i = P_{erro} \cdot \frac{P_{i, inicial}}{\sum_{m=1, m \neq k}^N P_{m, inicial}}, \quad (1)$$

$$\Delta P_{i, novo} = P_{i, inicial} + \Delta P_i \quad (2)$$

em que  $P_{i, inicial}$  é a potência de saída inicial do DER  $i$  antes da contingência e  $P_{m, inicial}$  representa a potência de saída inicial dos outros DERs, enquanto  $P_{erro}$  indica o erro da potência total do sistema em relação à referência e o dispositivo em falha é representado pelo DER  $k$ . Já  $\Delta P_{i, novo}$  é a referência de potência reajustada do DER  $i$ .

O controle por realimentação é implementado no bloco de controle, detalhado na Figura 2, em que são utilizados vários compensadores do tipo proporcional (um para cada DER) e um do tipo PID – para evitar oscilações na resposta de saída. O DER equipado com controlador PID é designado como o “*swing* DER” da VPP e é responsável por suavizar a saída e eliminar quaisquer erros de estado estacionário; normalmente, um DER com grande capacidade deve ser utilizado para garantir uma resposta adequada. A sintonia dos compensadores é feita em duas etapas: o PID é ajustado por meio do método de Ziegler-Nichols e, em seguida, os ganhos proporcionais  $K$  são determinados empiricamente conforme o melhor desempenho ao simular todo o sistema (com o PID já aplicado).

**Figura 2:** Diagrama de blocos da estrutura de controle.



Fonte: adaptado de Elkhatib, Johnson e Schoenwald (2017)

Um conjunto diversificado de equipamentos é considerado para a realização da simulação do sistema proposto. Os resultados apresentados demonstram a eficácia do método proposto: o tempo de resposta e o sobrepasso são apropriados para o fornecimento de energia e reserva ao mercado. Todavia, ao validar o sistema por meio de uma rede de comunicação real (com o protocolo Modbus), os ganhos obtidos para os controladores não são mais efetivos, produzindo um desempenho insatisfatório – os tempos maiores de comunicação entre os equipamentos inviabilizam as sintonias realizadas. É sugerido pelos autores como proposta de melhoria a comunicação em paralelo em vez da sequencial.

Portanto, com base nessa estrutura de VPP apresentada, o objetivo do presente trabalho é elaborar estratégias de projeto para os controladores da Figura 2, usando uma metodologia de controle baseada em referência virtual que é, neste trabalho, adaptada o caso da estrutura de controle específica do problema – ramos paralelos. Os resultados de simulação serão apresentados para comprovar a eficácia da metodologia proposta.

### 3 CONTROLE BASEADO EM DADOS

Um sistema de controle tem como objetivo aplicar sinais adequados ao processo a fim de fazer com que o sinal de saída apresente um comportamento pré-especificado, e que o efeito da ação das perturbações sobre este comportamento seja minimizado ou mesmo completamente eliminado (BAZANELLA; GOMES DA SILVA JR., 2005). Para o caso de um sistema discreto, monovariável (*single-input single-output* – SISO), linear e invariante no tempo (LIT), a saída é dada por

$$y(t) = G(z)u(t) + \nu(t) \quad (3)$$

em que  $t$  é o instante de tempo discreto,  $z$  é o operador de deslocamento em tempo discreto, ou seja,  $zx(t) = x(t + 1)$ ,  $G(z)$  é a função de transferência da planta,  $u(t)$  é o sinal de entrada da planta e  $\nu(t) = H(z)\epsilon(t)$  representa o processo de ruído com  $\epsilon(t)$  sendo um ruído branco com variância  $\sigma_e^2$  (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012). É importante frisar que ambas as funções de transferência,  $G(z)$  e  $H(z)$ , são racionais e causais, além de que  $G(z)$  deve possuir um ganho estático não nulo.

O controlador  $C(z, \rho)$ , parametrizado por  $\rho \in \mathbb{R}^p$ , que age sobre o processo é pertencente a uma classe definida pelo projetista, além de ser linear e invariante no tempo, que deve garantir um grau relativo positivo para a função laço  $C(z, \rho)G(z)$ . Considere o caso de um sistema de laço único, onde a ação de controle é dada por

$$u(t) = C(z, \rho) [r(t) - y(t)], \quad (4)$$

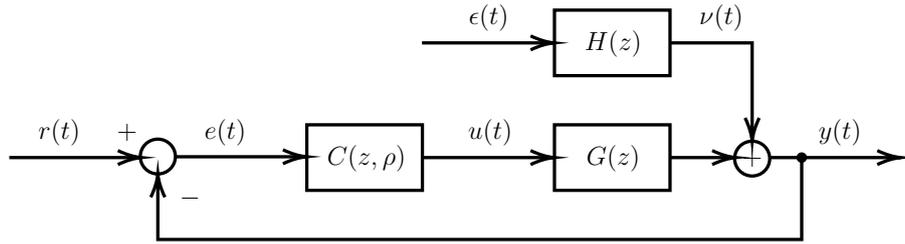
em que  $r(t)$  é o sinal de referência. A operação desse sistema em malha fechada, então, é descrita pelas equações:

$$\begin{cases} y(t, \rho) = T(z, \rho)r(t) + S(z, \rho)\nu(t) \\ T(z, \rho) = \frac{C(z, \rho)G(z)}{1 + C(z, \rho)G(z)} \\ S(z, \rho) = [1 - T(z, \rho)] = \frac{1}{1 + C(z, \rho)G(z)}. \end{cases} \quad (5)$$

A Figura 3 representa graficamente o sistema definido.

O projeto do controlador pode ser realizado através de diversas abordagens, dentre elas, há as metodologias de Controle Baseado em Dados (*Data-Driven* – DD), que são fundamentadas em dois aspectos principais: o modelo do processo não é conhecido e não se pretende determinar livremente a função de transferência do controlador (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012). Assim sendo, os ganhos de um controlador, de estrutura previamente fixada, são obtidos a partir de dados de entrada e saída adquiridos em ensaios na planta com o intuito de atingir um certo desempenho desejado em malha fechada (REMES, 2021; BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012). É evidente

**Figura 3:** Diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada.



Fonte: do autor

a diferença, então, em relação aos métodos clássicos de controle, como o Lugar Geométrico das Raízes (BAZANELLA; GOMES DA SILVA JR., 2005), que utilizam do conhecimento prévio, e determinado, da função de transferência do processo em análise.

Para a realização do projeto é necessário que se delimite um critério de performance de controle que o sistema deve respeitar ou minimizar: esse é geralmente chamado de problema de otimização (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012). Usualmente, busca-se otimizar o desempenho do sistema em atingir uma determinada característica, ou seja,

$$\min_{\rho} J(\rho) \quad (6)$$

em que a função  $J$  representa o custo – vale ressaltar que quanto menor o valor da função custo, melhor é o desempenho (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012) – e  $\rho$  é o vetor de parâmetros do controlador a ser inserido.

Um dos critérios mais utilizados é o da norma  $\mathcal{H}_2$  descrita na forma

$$\|x(t)\|^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [x(t)]^2 \quad (7)$$

para um sinal particular  $x(t)$ , determinado pelo método de projeto, da malha de controle de interesse. Para o caso DD, o problema de otimização pode ser formulado e resolvido por diferentes perspectivas com base nessa norma, como é apontado em Bazanella, Campestrini e Eckhard (2012): *Correlation-based Tuning* (CbT), *Iterative Feedback Tuning* (IFT), *Virtual Reference Feedback Tuning* (VRFT), *Virtual Disturbance Feedback Tuning* (VDFT), entre outros.

Como descrito em Bazanella, Campestrini e Eckhard (2012), existem três objetivos de controle fundamentais: seguimento de referência, rejeição à ruído e economia de esforço de controle. Uma vez que tem-se como finalidade a utilização do método VRFT no presente trabalho, o objetivo de controle de seguimento de referência será abordado.

### 3.1 CONTROLE POR MODELO DE REFERÊNCIA

Para os projetos de Controle por Modelo de Referência (*Model Reference Control* – MRC), é necessário que seja definida uma função de transferência ideal  $T_d(z)$ , com o comportamento desejado em malha fechada considerando a referência e a saída (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012); ou seja, tem-se como objetivo o seguimento de referência. Para isso, há o interesse em minimizar o critério presente na seguinte equação:

$$J_y(\rho) \triangleq \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y_r(t, \rho) - y_d(t)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [(T(z, \rho) - T_d(z)) r(t)]^2 \quad (8)$$

em que  $y_r(t, \rho)$  é a saída do sistema realimentado com o controlador a ser projetado e  $T(z, \rho)$  é a função de transferência do sistema obtidas com o controlador projetado e  $y_d(t)$  é a saída desejada do sistema. Assim, quanto mais perto o sinal de saída em malha fechada com o controlador sintonizado estiver do ideal projetado, menor será a função custo, como esperado.

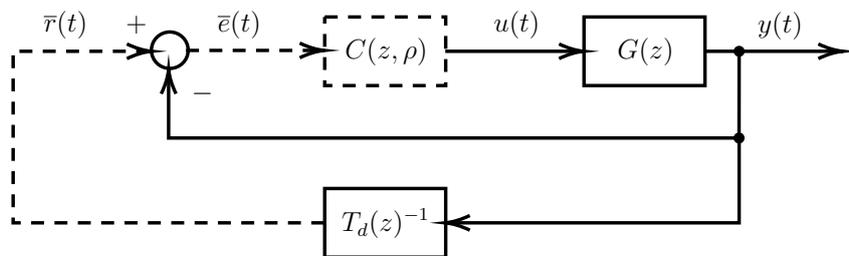
Constata-se que se  $\exists \rho^* : C(z, \rho^*) = C_d(z)$ , ou seja, se a estrutura  $\bar{C}(z)$  é tal que o controlador ideal  $C_d(z) \in \mathcal{C}$ , onde  $\mathcal{C}$  é a classe de controladores definida por  $C(z, \rho)$ , então  $J_y(\rho^*)$  é nulo (REMES, 2021). Dessa forma, o sistema em malha fechada responde exatamente como o especificado pelo modelo de referência (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012). Vale destacar que em controle baseado em dados a estrutura do controlador é definida previamente e que, como o modelo do sistema não é conhecido, ou por restrição de implementação, nem sempre o controlador ideal vai estar na classe escolhida.

Vale acentuar, ainda, que o modelo de referência  $T_d(z)$  definido deve possuir um grau relativo maior ou igual ao da planta  $G(z)$ , em outros termos,  $\Gamma\{T_d(z)\} \geq \Gamma\{G(z)\}$  em que o símbolo  $\Gamma$  significa o grau relativo, para que o controlador ideal seja causal (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012). É neste momento em que se torna importante um conhecimento básico do processo, como uma percepção acerca do formato da classe do sistema (sem saber os parâmetros explícitos); afinal, é praticamente impossível projetar adequadamente um controlador para um determinado processo sem saber absolutamente nada sobre este (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012). Portanto, o que os métodos DD propõem não é projetar um controlador completamente no escuro, mas sim prosseguir com apenas algumas informações básicas sobre o processo.

### 3.2 MÉTODO DA REFERÊNCIA VIRTUAL (VRFT)

O Método da Referência Virtual (*Virtual Reference Feedback Tuning* – VRFT) é um método de controle baseado em dados, que não é iterativo (também chamado de “*one-shot*”), para a função de (8) a partir do rastreamento de uma referência virtual (CAMPPI; LECCHINI; SAVARESI, 2002). Essa referência virtual é indiretamente determinada por meio do ensaio com a planta, isto é, uma batelada de dados de entrada e saída coletados, e a definição de um modelo de referência desejado.

**Figura 4:** Diagrama de blocos da malha fechada para o projeto, em que as linhas tracejadas representam os dados virtuais.



Fonte: Remes (2021)

Para o caso ideal – em que o sistema não é afetado por ruído, o controlador ideal pertence à classe considerada no projeto e é parametrizado linearmente – através de um experimento em malha aberta ou fechada do sistema, a planta é excitada com o sinal  $u(t)$

e é coletada a saída  $y(t)$  (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012), como visto na Figura 4. O ensaio virtual, então, consiste em utilizar tais sinais como se tivessem sido adquiridos em malha fechada com o controlador ideal,  $C_d(z)$ , desejado. Assim, a referência virtual é

$$\bar{r}(t) = \frac{1}{T_d(z)}y(t). \quad (9)$$

Como o sistema, nesse ensaio virtual, estaria teoricamente operando com o controlador ideal  $C_d(z)$ , que contém os parâmetros a serem definidos, a resposta em malha fechada resultaria na função de transferência desejada. Desta maneira, é possível definir a relação entre o sinal de entrada do controlador, que é o erro

$$\bar{e}(t) = \bar{r}(t) - y(t), \quad (10)$$

com o sinal aplicado à planta. Logo, o problema torna-se de identificação de parâmetros para o modelo de controlador  $C(z, \rho)$ , escrito como

$$C(z, \rho) = \rho^T \bar{C}(z) \quad (11)$$

em que  $\bar{C}(z)$  é um vetor de funções de transferência, a partir da função custo entre o sinal aplicado à planta,  $u(t)$ , com o obtido pelo ensaio virtual,  $\bar{u}(t) = C(z, \rho)\bar{e}(t)$ . Então, procura-se minimizar uma função quadrática:

$$J^{VR}(\rho) \triangleq \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [u(t) - C(z, \rho)\bar{e}(t)]^2 \quad (12)$$

que, idealmente<sup>1</sup>, possui o mesmo mínimo global que a expressão  $J_y(\rho)$  e pode ser minimizada uma vez que não depende da planta – considerada desconhecida. Ainda, essa pode ser reescrita como

$$J^{VR}(\rho) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [u(t) - \rho^T \varphi(t)]^2 \quad (13)$$

em que  $\varphi(t)$  é o vetor regressor definido da seguinte maneira:

$$\varphi(t) = \bar{C}(z)\bar{e}(t) = \bar{C}(z) \left[ \frac{1 - T_d(z)}{T_d(z)} \right] y(t). \quad (14)$$

Portanto, a solução para o problema de minimização para a função custo assume a seguinte forma, a partir dos mínimos quadrados de um conjunto de  $N$  dados de entrada-saída (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012; LASCH; CAMPESTRINI; LIMA, 2021):

$$\hat{\rho} = \left[ \sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^N \varphi(t)u(t). \quad (15)$$

A função custo ainda pode incluir um filtro  $L(z)$  para os casos em que a classe de controladores escolhida é subparametrizada, isto é,  $C_d(z) \notin \mathcal{C}$ ; esse, então, é utilizado para

---

<sup>1</sup>Isto é,  $C_d(z) \in \mathcal{C}$  e não há ruído.

aproximar o mínimo de  $J^{VR}(\rho)$  ao mínimo de  $J_y(\rho)$ . Esse filtro possui módulo que satisfaz a relação (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012)

$$|L(e^{j\Omega})|^2 = |T_d(e^{j\Omega})|^2 |S(e^{j\Omega}, \rho)|^2 \frac{\phi_r(e^{j\Omega})}{\phi_u(e^{j\Omega})}, \quad \forall \Omega \in [-\pi; \pi], \quad (16)$$

em que  $\phi_r(e^{j\Omega})$  é o espectro da referência aplicada ao processo durante a operação, e não o da referência virtual,  $\phi_u(e^{j\Omega})$  é o espectro do sinal  $u(t)$  aplicado no ensaio e  $S(e^{j\Omega}, \rho)$  é o espectro da função de sensibilidade. Considerando a aproximação

$$|S(e^{j\Omega}, \rho)|^2 \approx |S(e^{j\Omega})|^2 = |1 - T_d(e^{j\Omega})|^2, \quad (17)$$

então

$$|L(e^{j\Omega})|^2 = |T_d(e^{j\Omega})|^2 |1 - T_d(e^{j\Omega})|^2 \frac{\phi_r(e^{j\Omega})}{\phi_u(e^{j\Omega})}, \quad \forall \Omega \in [-\pi; \pi]. \quad (18)$$

Se a coleta de dados for realizada com um ensaio em malha aberta, pode-se aplicar  $u(t)$  de forma a imitar a referência que será posteriormente aplicada à planta – o que resulta em  $\phi_r(e^{j\Omega})/\phi_u(e^{j\Omega}) = 1$  (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012). Portanto, nesse caso particular, a função de transferência é definida como (REMES, 2021):

$$L(z) = T_d(z)[1 - T_d(z)]. \quad (19)$$

Conseqüentemente, a função de custo resultante é

$$J_L^{VR}(\rho) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [L(z)[u(t) - C(z, \rho)\bar{e}(t)]]^2. \quad (20)$$

Assim, a estimativa que minimiza o custo assume a forma (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012):

$$\hat{\rho} = \left[ \sum_{t=1}^N \varphi_L(t) \varphi_L^T(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^N \varphi_L(t) u_L(t) \quad (21)$$

em que  $\varphi_L(t) = L(z)\varphi(t)$  e  $u_L(t) = L(z)u(t)$ . Destaca-se, no entanto, que se a classe de controladores escolhida for muito distinta da ideal, então o método VRFT torna-se ineficaz e pode até resultar em instabilidade, independentemente do uso do filtro. Ademais, considerando o caso prático em que há ruído na coleta de dados, a estimativa de  $\rho$  obtida é polarizada; pode-se, então, utilizar variáveis instrumentais (REMES, 2021; BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2012) com o intuito de eliminar tal polarização da estimativa a custo de um possível aumento na variância de  $\hat{\rho}$ .

## 4 VRFT PARA MALHA DE CONTROLE COM LAÇOS PARALELOS

As metodologias de sintonia dos controladores que são propostas nas seções seguintes tem como base a estrutura de controle apresentada em Elkhatib, Johnson e Schoenwald (2017): cada DER utilizada possui como entrada um controlador próprio, que é alimentado pela diferença entre a referência de energia da VPP e a energia instantânea produzida pelo sistema, e uma referência específica, que é determinada por um bloco de otimização. Neste trabalho são propostos os ajustes dos controladores utilizados por meio do método baseado em dados VRFT – diferentemente de como foi desenvolvido em Elkhatib, Johnson e Schoenwald (2017), em que foram utilizados métodos tradicionais como Ziegler-Nichols e seleção de ganhos através da simulação. Para isso, são propostas duas formulações para os ajustes dos compensadores, com base em desempenhos desejados.

### 4.1 SINTONIA SEQUENCIAL

Considere a estrutura de controle, apresentada na Figura 5, em que os controladores –  $C_1(z, \rho_1)$  e  $C_2(z, \rho_2)$  – e processos –  $G_1(z)$  e  $G_2(z)$  – formam os laços paralelos. Como comentado no Capítulo 3,  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são os vetores de ganhos que parametrizam os controladores. O sinal de saída, neste caso, é o somatório das saídas individuais de cada laço, ou seja,

$$y(t, \rho_1, \rho_2) = [C_1(z, \rho_1)G_1(z) + C_2(z, \rho_2)G_2(z)] e(t). \quad (22)$$

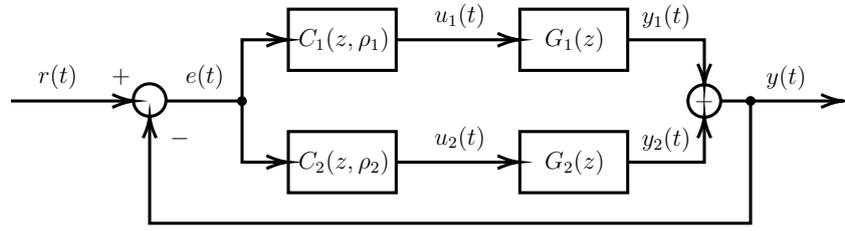
Logo, nota-se que o sinal de erro  $e(t) = r(t) - y(t, \rho_1, \rho_2)$  é comum às entradas de ambos compensadores. Assim, a função de transferência do sistema assume a forma

$$T(z, \rho_1, \rho_2) = \frac{C_1(z, \rho_1)G_1(z) + C_2(z, \rho_2)G_2(z)}{1 + C_1(z, \rho_1)G_1(z) + C_2(z, \rho_2)G_2(z)}. \quad (23)$$

Com base na abordagem apresentada em Corleta et al. (2016), na qual é realizado o projeto de controladores de forma independente e sequencial utilizando o método VRFT para uma UPS (*Uninterruptible Power Supply*), o problema de sintonia dos compensadores da malha de controle aqui considerada é solucionado de maneira similar. Portanto, procura-se determinar o vetor  $\rho$  de cada controlador que ajuste a resposta de acordo com o desempenho desejado à cada laço do sistema, de forma sequencial.

A partir de um ensaio com a planta  $G_1(z)$ , os dados  $\{u_1(t), y_1(t)\}_{t=1}^N$  são coletados para determinar, por meio do método VRFT, o vetor de parâmetros  $\rho_1$  do controlador  $C_1(z, \rho_1)$ ; a Figura 6 representa a malha para o ensaio. Para isso, define-se uma classe fixa

**Figura 5:** Diagrama de blocos para o sistema de controle em malha fechada com dois ramos.



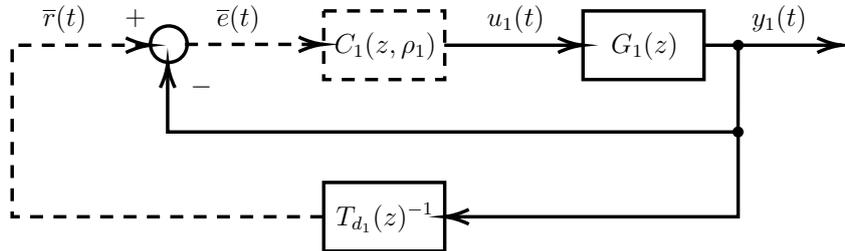
Fonte: do autor

para tal controlador e a função de transferência desejada à malha fechada única  $T_{d_1}(z)$ , isto é, a minimização é feita para o sistema composto exclusivamente por  $G_1(z)$  e  $C_1(z, \rho_1)$  em malha fechada. Desta maneira, a função laço desejada<sup>1</sup>  $\mathcal{L}_1^d(z) = C_{d_1}(z)G_1(z)$  está relacionada com a função de transferência da malha na forma

$$\mathcal{L}_1^d(z) = \frac{T_{d_1}(z)}{1 - T_{d_1}(z)}, \quad (24)$$

ou seja,  $\mathcal{L}_1^d(z)$  depende de  $T_{d_1}(z)$ , que é conhecida e estipulada pelo projetista.

**Figura 6:** Diagrama de blocos da malha única de aplicação do método VRFT.



Fonte: do autor

O passo seguinte é considerar o sistema em malha fechada já com o segundo laço em operação, isto é, incluindo  $G_2(z)$  e  $C_2(z, \rho_2)$ , e definir um novo modelo de referência,  $T_{d_2}(z)$ , a esse sistema como um todo. Da mesma forma que em (23), esse está relacionado com as funções laço como

$$T_{d_2}(z) = \frac{\mathcal{L}_1^d(z) + \mathcal{L}_2^d(z)}{1 + \mathcal{L}_1^d(z) + \mathcal{L}_2^d(z)}, \quad (25)$$

em que  $\mathcal{L}_2^d(z) = C_{d_2}(z)G_2(z)$  é o laço desejado<sup>2</sup>. Uma vez que  $T_{d_2}(z)$  e  $\mathcal{L}_1^d(z)$  são conhecidas e determinadas,

$$\begin{aligned} T_{d_2}(z)[1 + \mathcal{L}_1^d(z) + \mathcal{L}_2^d(z)] &= \mathcal{L}_1^d(z) + \mathcal{L}_2^d(z) \\ T_{d_2}(z) &= [1 - T_{d_2}(z)][\mathcal{L}_1^d(z) + \mathcal{L}_2^d(z)] \\ \frac{T_{d_2}(z)}{1 - T_{d_2}(z)} &= \mathcal{L}_1^d(z) + \mathcal{L}_2^d(z) \end{aligned}$$

<sup>1</sup>Considera-se  $C_{d_1}(z)$  como o controlador ideal.

<sup>2</sup>Considera-se  $C_{d_2}(z)$  como o controlador ideal.

$$\mathcal{L}_2^d(z) = \left[ \frac{T_{d_2}(z)}{1 - T_{d_2}(z)} \right] - \mathcal{L}_1^d(z) = \mathcal{L}_{T_2}^d(z) - \mathcal{L}_1^d(z), \quad (26)$$

na qual  $\mathcal{L}_{T_2}^d(z)$  é a função laço do modelo de referência para o sistema completo. Então, a função de transferência da sintonia virtual<sup>3</sup> é dada por

$$T_d^{SV}(z) = \frac{\mathcal{L}_2^d(z)}{1 + \mathcal{L}_2^d(z)}, \quad (27)$$

que é utilizada para sintonizar o controlador  $C_2(z, \rho_2)$ . A partir de tal expressão e uma batelada de dados  $\{u_2(t), y_2(t)\}_{t=1}^N$  coletados de um ensaio com a planta  $G_2(z)$ , além de uma estrutura fixada pelo projetista para o controlador, o vetor de parâmetros  $\rho_2$  pode ser definido pelo método VRFT.

Em resumo, a metodologia segue os seguintes passos:

1. Definir um modelo de referência  $T_{d_1}(z)$  e uma estrutura para o controlador  $C_1(z, \rho_1)$ . Coletar os dados  $\{u_1(t), y_1(t)\}_{t=1}^N$  por meio de um ensaio com a planta  $G_1(z)$  e, a partir do método VRFT, determinar  $\hat{\rho}_1$ ;
2. Definir um modelo de referência  $T_{d_2}(z)$ , para o sistema completo, uma estrutura para o controlador  $C_2(z, \rho_2)$  e calcular  $T_d^{SV}(z)$  usando (27). Coletar os dados  $\{u_2(t), y_2(t)\}_{t=1}^N$  por meio de um ensaio com a planta  $G_2(z)$  e, a partir do método VRFT, determinar  $\hat{\rho}_2$  que sintonize o compensador baseado em  $T_d^{SV}(z)$ .

Vale ressaltar que essa sequência de passos pode ser expandida para a quantidade de laços paralelos que o sistema em análise possuir, basta repetir o passo dois de modo que

$$\mathcal{L}_{i-1}^d(z) = \frac{T_{d_{i-1}}(z)}{1 - T_{d_{i-1}}(z)} \quad (28)$$

e

$$\mathcal{L}_i^d(z) = \mathcal{L}_{T_i}^d(z) - \mathcal{L}_{i-1}^d(z), \quad (29)$$

em que  $i$  representa a iteração do método – por exemplo, para a sintonia de um terceiro laço,  $i = 3$ .

No entanto, algumas considerações precisam ser feitas: assume-se que a utilização do método VRFT em cada iteração é eficaz – isto é, os modelos de referência são seguidos a partir da sintonia dos controladores – e que  $\mathcal{T}_s\{T_{d_i}(z)\} < \mathcal{T}_s\{T_{d_{i-1}}(z)\}$  na qual o símbolo  $\mathcal{T}_s$  representa o tempo de acomodação, ou seja, o tempo de acomodação do modelo de referência considerado a cada iteração deve ser menor que o da iteração anterior. Isso se deve ao fato de que se  $\mathcal{T}_s\{T_{d_i}(z)\} \geq \mathcal{T}_s\{T_{d_{i-1}}(z)\}$ , a função laço  $\mathcal{L}_i^d(z)$ , a partir de (29), é negativa e resulta em uma  $T_d^{SV}(z)$  com polo instável.

Considere duas funções de transferência de primeira ordem e com ganho unitário em regime permanente, utilizadas para uma sintonia, com polos estritamente reais e estáveis, isto é,  $\{a, b \in (0, 1) \subset \mathbb{R}\}$ , dadas por

$$T_{d_1}(z) = \frac{1 - a}{(z - a)}, \quad (30)$$

---

<sup>3</sup>É nomeada como virtual já que a sintonia é feita como se o sistema possuísse a estrutura de uma malha fechada única, isto é, apenas um controlador e um processo.

$$T_{d_2}(z) = \frac{1-b}{(z-b)}, \quad (31)$$

onde  $T_{d_1}(z)$  é a função de transferência em malha fechada do sistema já atuante e  $T_{d_2}(z)$  é o modelo de referência desejado ao sistema com a adição de um novo ramo paralelo. As respectivas funções laço, a partir de (28), são

$$\mathcal{L}_1^d(z) = \frac{1-a}{(z-1)}, \quad (32)$$

$$\mathcal{L}_{T_2}^d(z) = \frac{1-b}{(z-1)}, \quad (33)$$

e por meio de (29) tem-se

$$\mathcal{L}_2^d(z) = \mathcal{L}_{T_2}^d(z) - \mathcal{L}_1^d(z) = \frac{a-b}{(z-1)}. \quad (34)$$

Então, a função de transferência desejada para a sintonia virtual, com base em (27), é

$$T_d^{SV}(z) = \frac{a-b}{[z - (1-a+b)]} \quad (35)$$

e apenas é estável se todas as raízes do denominador estiverem dentro do círculo de raio unitário, ou seja,  $|z| < 1$ . Dessa maneira, como o polo do sistema é  $z = 1 - (a - b)$ , esse deve satisfazer  $|z| = |1 - (a - b)| < 1$ ; portanto  $a > b$ . Uma vez que os polos  $a$  e  $b$  ditam o tempo de acomodação das respectivas funções de transferência (quanto mais perto esses estiverem de zero, mais rápida é a resposta), então a restrição  $\mathcal{T}_s\{T_{d_i}(z)\} < \mathcal{T}_s\{T_{d_{i-1}}(z)\}$  é necessária ao projeto.

Ademais, na sintonia sequencial, para que a  $T_{d_i}(z)$  possa ser escolhida livremente, cabe ao projetista definir uma estrutura ao controlador tal que o compensador ideal esteja na classe de controladores escolhida – isso implica no conhecimento prévio, ao menos, da classe da planta (se é um sistema de primeira ou segunda ordem, por exemplo). Esse conjunto de considerações definem, então, a aplicação ideal do método.

#### 4.1.1 Validação da Sintonia Sequencial Ideal

Com o intuito de validar o método proposto, são apresentadas simulações para uma estrutura de controle igual à vista na Figura 5, tratando-se do caso ideal em que os controladores definidos pertencem à classe ideal e não há ruído. Considera-se o sistema em tempo discreto, com período de amostragem de 0,5 segundos, em que os dois processos

$$G_1(z) = \frac{0,1535}{z - 0,8465}, \quad (36)$$

com tempo de acomodação em torno de 12 segundos, e

$$G_2(z) = \frac{0,1248}{z - 0,8752}, \quad (37)$$

com tempo de acomodação em torno de 15 segundos, são controlados por  $C_1(z, \rho_1)$  e  $C_2(z, \rho_2)$ , respectivamente. Como ambos processos são de primeira ordem, é proposta a utilização de dois compensadores proporcionais-integrais (PI), na forma

$$C(z, \rho) = \begin{bmatrix} k_P & k_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ z \\ z - 1 \end{bmatrix}. \quad (38)$$

A partir de um ensaio em malha aberta com a  $G_1(z)$ , são coletados os dados  $\{u_1(t), y_1(t)\}_{t=1}^{N=50}$  para uma excitação do tipo salto na planta. Então, define-se um modelo de referência, para a primeira sintonia, com tempo de acomodação em torno de 8 segundos, dado por

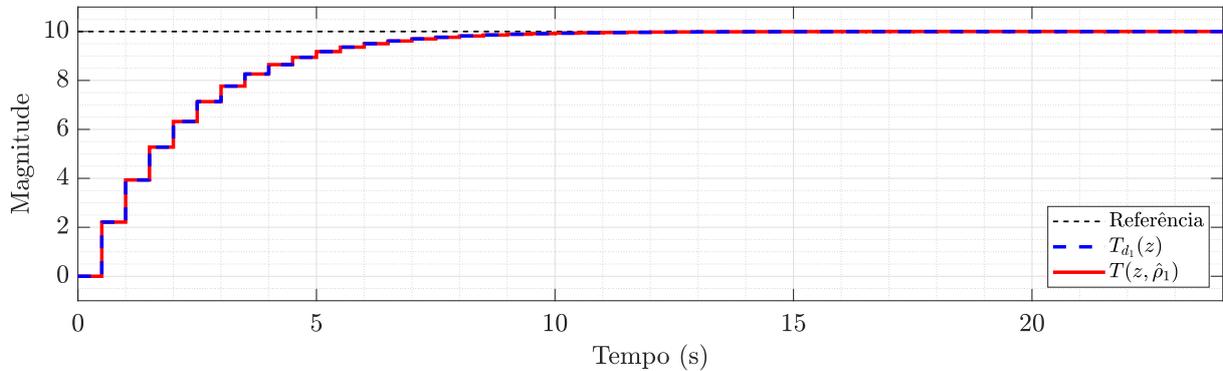
$$T_{d_1}(z) = \frac{0,2212}{z - 0,7788}. \quad (39)$$

Ao aplicar o VRFT, o parâmetro identificado  $\hat{\rho}_1$  resulta no controlador

$$C_1(z, \hat{\rho}_1) = 1,2197 + 0,2212 \left[ \frac{z}{z - 1} \right]. \quad (40)$$

A Figura 7 apresenta os resultados do sistema operando em malha fechada – apenas com  $G_1(z)$  – com o controlador de (40), sendo obtido um comportamento igual ao desejado.

**Figura 7:** Resultados da simulação da  $G_1(z)$  em malha fechada com o controlador  $C_1(z, \hat{\rho}_1)$  projetado.



Fonte: do autor

Na sequência, define-se o modelo de referência desejado ao sistema composto pelos dois controladores, com base em (27), dado por

$$T_{d_2}(z) = \frac{0,3935}{z - 0,6065} \quad (41)$$

com tempo de acomodação por volta de 4 segundos, ou seja, mais rápido que em (39) – isso é um requisito imposto na Seção 4.1. A partir de (27), a função de transferência para a sintonia virtual é obtida

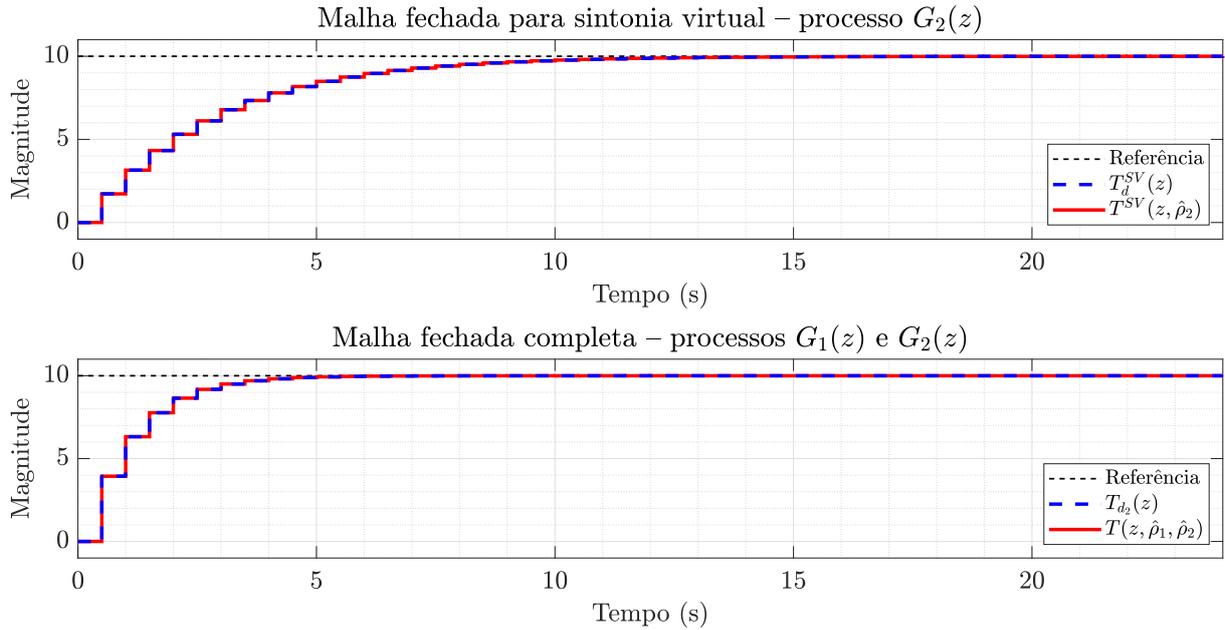
$$T_d^{SV}(z) = \frac{0,1723}{z - 0,8277}. \quad (42)$$

Logo, por meio de um ensaio com a  $G_2(z)$ , são coletados os dados  $\{u_2(t), y_2(t)\}_{t=1}^{N=50}$  para uma excitação do tipo salto na planta e determina-se o parâmetro  $\hat{\rho}_2$  para o controlador

$$C_2(z, \hat{\rho}_2) = 1,2078 + 0,1723 \left[ \frac{z}{z-1} \right], \quad (43)$$

ao utilizar o método VRFT. A Figura 8 apresenta os resultados do sistema completo, em malha fechada, operando com os controladores definidos.

**Figura 8:** Resultados da simulação do controlador  $C_2(z, \hat{\rho}_2)$  projetado em malha fechada com  $G_2(z)$  e para o sistema completo.



Fonte: do autor

Nota-se que, novamente, é atingido o comportamento igual ao desejado tanto para a sintonia virtual quanto para o sistema completo, em que estão presentes os dois controladores, em ramos paralelos, com os seus respectivos processos. Portanto, a aplicação para o caso ideal do método apresenta o resultado esperado de acordo com as especificações delimitadas pelo projetista.

## 4.2 SINTONIA MATRICIAL CONJUNTA

Considere, agora, a estrutura de controle com um número de  $n$  laços paralelos apresentada na Figura 9. Os controladores  $\{C_i(z, \rho_i) \mid i \in [1, n]\}$  e processos  $\{G_i \mid i \in [1, n]\}$  formam os laços paralelos e os vetores de ganhos que parametrizam os controladores são  $\{\rho_i \mid i \in [1, n]\}$ . Da mesma forma que em (23), o sistema é representado por

$$T(z, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) = \frac{C_1(z, \rho_1)G_1(z) + C_2(z, \rho_2)G_2(z) + \dots + C_n(z, \rho_n)G_n(z)}{1 + C_1(z, \rho_1)G_1(z) + C_2(z, \rho_2)G_2(z) + \dots + C_n(z, \rho_n)G_n(z)}, \quad (44)$$

o que resulta em

$$T(z) = \frac{\mathcal{L}_1(z) + \mathcal{L}_2(z) + \dots + \mathcal{L}_n(z)}{1 + \mathcal{L}_1(z) + \mathcal{L}_2(z) + \dots + \mathcal{L}_n(z)}. \quad (45)$$

A fim de isolar os laços paralelos tem-se

$$\begin{aligned} T(z)[1 + \mathcal{L}_1(z) + \mathcal{L}_2(z) + \cdots + \mathcal{L}_n(z)] &= \mathcal{L}_1(z) + \mathcal{L}_2(z) + \cdots + \mathcal{L}_n(z) \\ T(z) &= [1 - T(z)][\mathcal{L}_1(z) + \mathcal{L}_2(z) + \cdots + \mathcal{L}_n(z)] \\ \frac{T(z)}{1 - T(z)} &= \mathcal{L}_1(z) + \mathcal{L}_2(z) + \cdots + \mathcal{L}_n(z) \end{aligned} \quad (46)$$

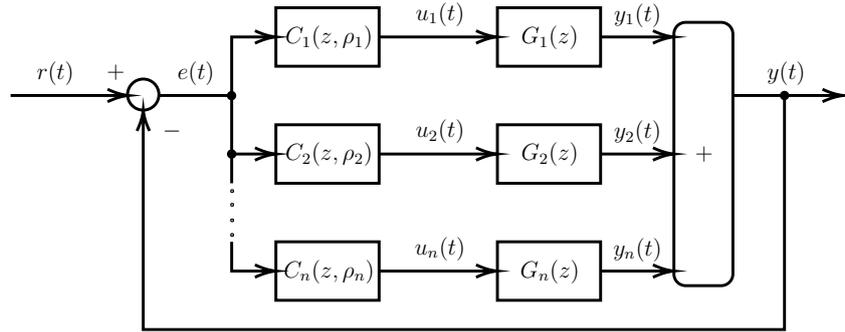
e define-se a relação da função de transferência da malha com a função laço

$$\mathcal{L}(z) = \frac{T(z)}{1 - T(z)}. \quad (47)$$

Por fim, é determinada a expressão que relaciona a função laço do sistema com as dos laços paralelos:

$$\mathcal{L}(z) = \mathcal{L}_1(z) + \mathcal{L}_2(z) + \cdots + \mathcal{L}_n(z) = \sum_{i=1}^n \mathcal{L}_i(z). \quad (48)$$

**Figura 9:** Diagrama de blocos para o sistema de controle em malha fechada com  $n$  ramos.



Fonte: do autor

É visto que a função laço do sistema completo é igual ao somatório das funções laço dos ramos individuais, desta forma, a utilização do método VRFT para a sintonia individual e independente de cada ramo pode ser aplicada. Isto significa que o projetista pode definir as funções laço dos ramos paralelos arbitrariamente e utilizar o método VRFT individualmente para cada uma delas, desde que a soma de todos os laços atenda à função laço geral desejada ao sistema completo. Portanto, a função custo resultante que descreve o problema de minimização, a partir de (14) e (20), assume a forma

$$\begin{aligned} J^{MC}(\rho_1, \dots, \rho_n) &\triangleq \sum_{i=1}^n \left\| L_i(z) \left[ u_i(t) - \rho_i^T \bar{C}_i(z) \left[ \frac{1 - T_{d_i}(z)}{T_{d_i}(z)} \right] y_i(t) \right] \right\|^2 \\ &\triangleq \sum_{i=1}^n \left\| L_i(z) \left[ u_i(t) - \rho_i^T \bar{C}_i(z) \mathcal{L}_i^d(z)^{-1} y_i(t) \right] \right\|^2 \\ &\triangleq \sum_{i=1}^n \left\| L_i(z) \left[ \mathcal{L}_i^d(z) u_i(t) - \rho_i^T \bar{C}_i(z) y_i(t) \right] \right\|^2 \end{aligned} \quad (49)$$

em que  $T_{d_i}(z)$  é a função de transferência desejada à sintonia virtual de cada laço,  $\mathcal{L}_i^d(z)$  é a função laço desejada a cada ramo e  $L_i(z)$  é o filtro utilizado para os casos em que a

classe de controladores escolhida é subparametrizada, como descrito em (19), na qual

$$L_i(z) = T_{d_i}(z) [1 - T_{d_i}(z)] = \frac{\mathcal{L}_i^d(z)}{[1 + \mathcal{L}_i^d(z)]^2}. \quad (50)$$

Uma vez que as sintonias são independentes entre si, isto é, os parâmetros dos controladores são determinados exclusivamente pelas sintonias virtuais individuais, então os filtros  $L_i(z)$  dependem apenas de cada  $\mathcal{L}_i^d(z)$ .

A estimação dos parâmetros que minimizam a função custo de (49) é feita por mínimos quadrados, que pode ser representada na forma matricial

$$J^{MC}(\rho) = \|U - \phi\rho\|^2 \quad (51)$$

em que o vetor de parâmetros é  $\rho = [\rho_1 \ \rho_2 \ \dots \ \rho_n]^T$  e a solução assume a forma (TOGNETTI, 2021):

$$\hat{\rho} = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T U. \quad (52)$$

Para o presente caso, o vetor dos sinais de controle filtrados é

$$U = \sum_{t=1}^N \begin{bmatrix} L_1(z) \mathcal{L}_1^d(z) u_1(t) \\ L_2(z) \mathcal{L}_2^d(z) u_2(t) \\ \vdots \\ L_n(z) \mathcal{L}_n^d(z) u_n(t) \end{bmatrix} \quad (53)$$

enquanto a matriz regressora é diagonal e composta pelos sinais de saída filtrados:

$$\phi = \sum_{t=1}^N \begin{bmatrix} L_1(z) \bar{C}_1(z) y_1(t) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L_2(z) \bar{C}_2(z) y_2(t) & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & L_n(z) \bar{C}_n(z) y_n(t) \end{bmatrix}. \quad (54)$$

Em resumo, a metodologia segue os seguintes passos:

1. Definir um modelo de referência  $T_d(z)$  para o sistema completo e calcular, a partir de (47), a função laço geral desejada;
2. Por meio de (48), escolher arbitrariamente as funções de transferências para laços paralelos,  $\mathcal{L}_i^d(z)$ , e também as estruturas para os controladores  $C_i(z, \rho_i)$  que atendam aos requisitos almejados pelo projetista;
3. Coletar os dados  $\{u_i(t), y_i(t)\}_{t=1}^N$  por meio de ensaios com as plantas  $G_i(z)$  e, a partir de (52), determinar o vetor de parâmetros  $\hat{\rho}$ .

Vale enfatizar que para a livre escolha das  $\mathcal{L}_i^d(z)$ , e conseqüentemente para  $T_d(z)$ , cabe ao projetista definir estruturas aos controladores tal que os compensadores ideais estejam nas classes de controladores escolhidas – isso implica no conhecimento prévio, ao menos, das classes da plantas – assim como é para a sintonia sequencial.

É evidente que as metodologias sequencial e matricial conjunta são equivalentes para determinar os ganhos dos controladores do sistema em malha fechada com ramos

paralelos. Todavia, podem ser utilizadas em cenários distintos: recomenda-se a sintonia matricial conjunta quando pretende-se ajustar várias malhas em um sistema novo; já a sintonia sequencial é recomendada na sintonia de novos ramos paralelos em um sistema já existente. Ainda, a sequencial requer um cuidado maior do projetista para que a aplicação do método seja eficaz, uma vez que os tempos de acomodação dos modelos de referência projetados devem ser menores a cada iteração.

#### 4.2.1 Validação da Sintonia Matricial Conjunta Ideal

Com o intuito de validar o método proposto, considerando o caso ideal em que os controladores definidos pertencem à classe ideal e não há ruído, é apresentada a simulação para uma estrutura de controle igual à vista na Figura 9, mas para três ramos. Considera-se o sistema em tempo discreto, com período de amostragem de 0,5 segundos, em que os três processos

$$G_1(z) = \frac{0,1535}{z - 0,8465}, \quad (55)$$

com tempo de acomodação em torno de 12 segundos,

$$G_2(z) = \frac{0,1248}{z - 0,8752}, \quad (56)$$

com tempo de acomodação em torno de 15 segundos, e

$$G_3(z) = \frac{0,111}{z - 0,889}, \quad (57)$$

com tempo de acomodação em torno de 17 segundos, são controlados por  $C_1(z, \rho_1)$ ,  $C_2(z, \rho_2)$  e  $C_3(z, \rho_3)$ , respectivamente. Como os processos são de primeira ordem, é proposta a utilização de três compensadores proporcionais-integrais (PI), na forma

$$C(z, \rho) = \begin{bmatrix} k_P & k_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ z \\ z - 1 \end{bmatrix}. \quad (58)$$

A partir de ensaios em malha aberta com as três plantas, são coletados os dados para uma excitação do tipo salto em cada uma delas. Então, define-se um modelo de referência com tempo de acomodação em torno de 4 segundos, dado por

$$T_d(z) = \frac{0,3935}{z - 0,6065}, \quad (59)$$

e calcula-se, a partir de (47) e (48), as funções de transferência desejadas a cada laço considerando os seguintes pesos:  $\mathcal{L}_1^d(z) = 0,5 \cdot \mathcal{L}_T^d(z)$ ,  $\mathcal{L}_2^d(z) = 0,3 \cdot \mathcal{L}_T^d(z)$  e  $\mathcal{L}_3^d(z) = 0,2 \cdot \mathcal{L}_T^d(z)$ .

Ao aplicar o VRFT na forma matricial, conforme (52), os parâmetros identificados para o vetor  $\hat{\rho}$  resultam nos controladores

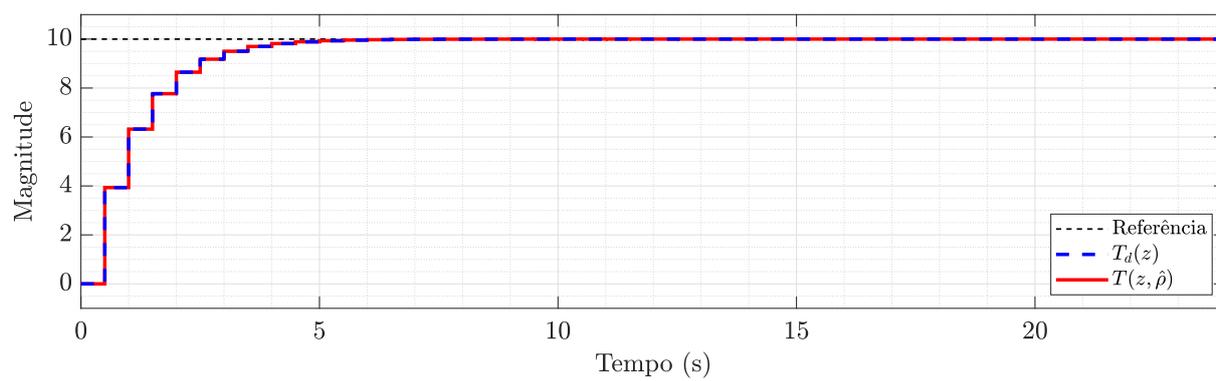
$$C_1(z, \hat{\rho}_1) = 1,0848 + 0,1967 \left[ \frac{z}{z - 1} \right], \quad (60)$$

$$C_2(z, \hat{\rho}_2) = 0,8276 + 0,1180 \left[ \frac{z}{z - 1} \right], \quad (61)$$

$$C_3(z, \hat{\rho}_3) = 0,6303 + 0,0787 \left[ \frac{z}{z - 1} \right]. \quad (62)$$

A Figura 10 apresenta os resultados do sistema completo, em malha fechada, operando com os controladores definidos – é obtido um comportamento igual ao desejado.

**Figura 10:** Resultados da simulação para o sistema completo com os controladores  $C_1(z, \hat{\rho}_1)$ ,  $C_2(z, \hat{\rho}_2)$  e  $C_3(z, \hat{\rho}_3)$  definidos.



Fonte: do autor

## 5 MODELAGEM E CONTROLE DE UMA USINA VIRTUAL DE ENERGIA

A estrutura geral da usina virtual de energia, na qual tem-se interesse no controle de potência ativa, é detalhada nas seções seguintes. Para isso, são abordados o modelo para as plantas fotovoltaicas utilizadas e um breve estudo sobre a ordem de tais sistemas. Ainda, os principais parâmetros ajustados da VPP são expostos.

As simulações da usina virtual de energia, com a utilização dos compensadores individuais de cada planta fotovoltaica, também são tema do presente capítulo. Para tanto, são discutidos sobre os projetos e aplicação das sintonias matricial conjunta e sequencial, nas seções seguintes, com o intuito de validar as metodologias propostas.

### 5.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO GENÉRICO

O modelo de plantas fotovoltaicas a ser utilizado é baseado na estrutura sugerida pela *Renewable Energy Modeling Task Force of the Western Electric Coordinating Council* (WECC) – é uma entidade regional, que engloba estados e províncias do Canadá ao México, responsável pelo monitoramento e fiscalização da conformidade do sistema elétrico (WECC, 2024). Tal modelo é genérico e precisa seguir uma lista de especificações (ELLIS; BEHNKE; ELLIOTT, 2013), como, por exemplo:

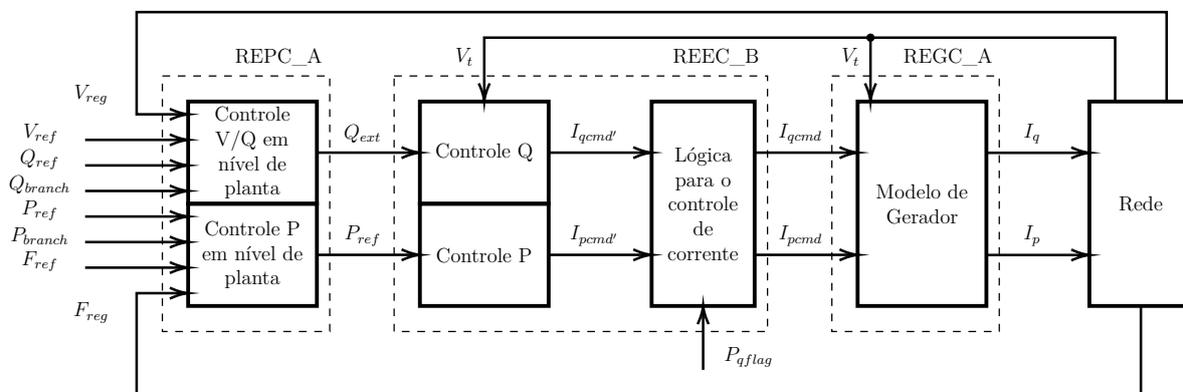
- Deve ser não proprietário;
- Deve fornecer uma representação razoável da dinâmica elétrica desempenho de usinas solares fotovoltaicas no ponto de interligação com o sistema elétrico;
- O modelo deve ser adequado para estudar a resposta do sistema a perturbações elétricas, desconsiderando transientes de irradiância solar;
- As simulações realizadas usando esse modelo normalmente cobrem um período de 20 a 30 segundos, com etapas de tempo de integração na faixa de 1 a 10 milissegundos.

A estrutura geral é mostrada na Figura 11 e pode representar uma planta fotovoltaica ou eólica – basta utilizar o bloco REEC\_A, para eólica, ou o REEC\_B, para fotovoltaica. Os principais controles que compõem tal modelo são (ESIG, 2015; ASHOURIAN; GRAS, 2022; MULJADI; SINGH; GEVORGIAN, 2014):

- *Renewable Energy Generator Controller* (REGC\_A): Usado para representar a interface gerador/conversor (inversor) com a rede. Ele processa os comandos de corrente ativa e reativa e controla a injeção dessas no modelo de rede;

- *Renewable Energy Electrical Controller (REEC\_B)*: Utilizado para representar os controles elétricos dos inversores. Atua de acordo com a referência de potência ativa e reativa do REPC\_A, com realimentação da tensão terminal e da potência de saída do gerador, e fornece comandos de corrente real e reativa ao módulo REGC\_A;
- *Renewable Energy Plant Controller (REPC\_A)*: Usado para representar o controlador da planta. Ele processa a saída de tensão e potência reativa para emular o controle volt/var no nível da planta. Ele também processa frequência e saída de potência ativa para emular o controle de potência ativa, além de fornecer os comandos de potência reativa e ativa para o módulo REEC\_B.

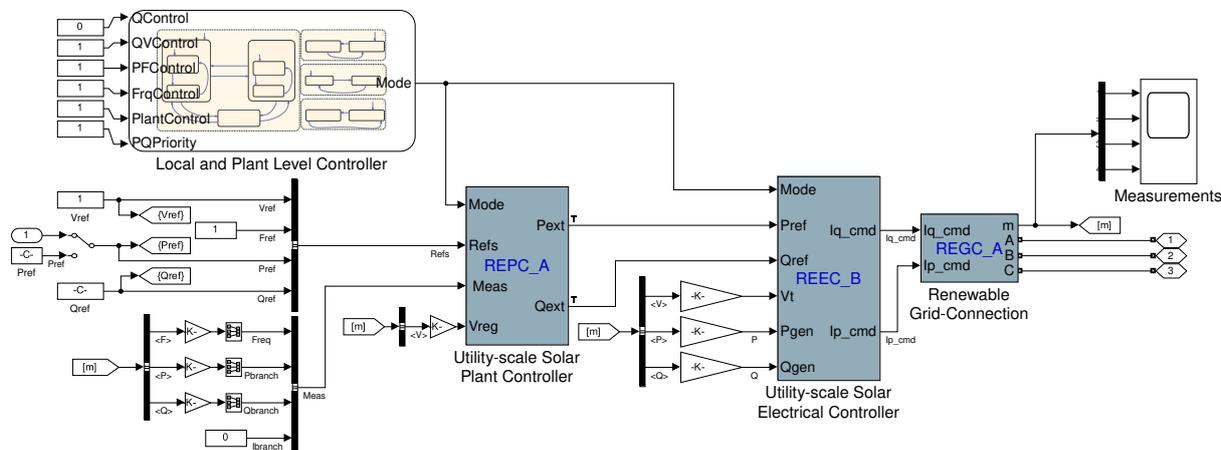
**Figura 11:** Diagrama de blocos do modelo para sistema fotovoltaico genérico.



Fonte: adaptado de Ellis, Behnke e Elliott (2013)

A implementação desse modelo é feita em LeSage (2022) no *software* Simulink® e apresentada na Figura 12. As entradas incluem a potência ativa de referência – que é o sinal de interesse a ser controlado no presente trabalho – e as configurações de controle, localizadas no bloco *Local and Plant Level Controller*, as quais são definidas no Apêndice A.

**Figura 12:** Modelo para sistema fotovoltaico genérico implementado no Simulink®.



Fonte: LeSage (2022)

### 5.1.1 Ordem dos Modelos de Plantas Fotovoltaicas

Conforme abordado na Seção 3.1, para os projetos de controle por modelo de referência é necessário o conhecimento básico sobre o processo a ser controlado, ou seja, uma noção acerca do formato da classe do sistema. Assim sendo, torna-se necessário um breve estudo sobre a ordem das funções de transferência para as plantas fotovoltaicas.

Em Bakeer et al. (2022), é elencado que as plantas fotovoltaicas são normalmente modeladas como sistemas de primeira ou segunda ordem – logo, esses são considerados como convencionais. Ainda, um modelo baseado em uma rede neural artificial é proposto e comparado aos convencionais na qual é concluído que todos os modelos apresentam, aproximadamente, o mesmo desempenho. Em Hansen et al. (2001) é apontado que os modelos de segunda ordem apresentam uma melhoria significativa em relação aos de primeira ordem, no entanto, o mesmo não é válido para os de terceira ordem. Por fim, em Khadanga, Kumar e Panda (2020) a função de transferência de ordem dois é utilizada na modelagem de um sistema híbrido fotovoltaico-térmico. Desta forma, neste trabalho assume-se que as plantas tenham uma dinâmica de segunda ordem para o projeto dos controladores da VPP.

## 5.2 MODELO DA USINA VIRTUAL DE ENERGIA

A usina virtual de energia que será utilizada neste trabalho tem estrutura baseada em Elkhatab, Johnson e Schoenwald (2017) e é composta por quatro plantas fotovoltaicas – de acordo com a implementação de LeSage (2022) – conectadas a uma rede trifásica. Desta forma, deseja-se o seguimento de referência de potência ativa da VPP através da sintonização individual dos controladores – esses sendo  $\{C_i \mid i \in [1, 4]\}$  – de cada planta; a Figura 13 representa o sistema implementado no Simulink®. É visto, também, que cada planta fotovoltaica tem como referência de potência ativa a soma de um valor base,  $\{DER_{ref,i} \mid i \in [1, 4]\}$ , e um valor de ajuste enviado pelo compensador individual de cada ramo  $\{u_i \mid i \in [1, 4]\}$  – ou seja, é similar ao diagrama apresentado na Figura 2. Por fim, as potências de saída de cada planta são representadas pelos sinais  $\{P_i \mid i \in [1, 4]\}$  enquanto a potência ativa total é dada por  $P_{tot}$ .

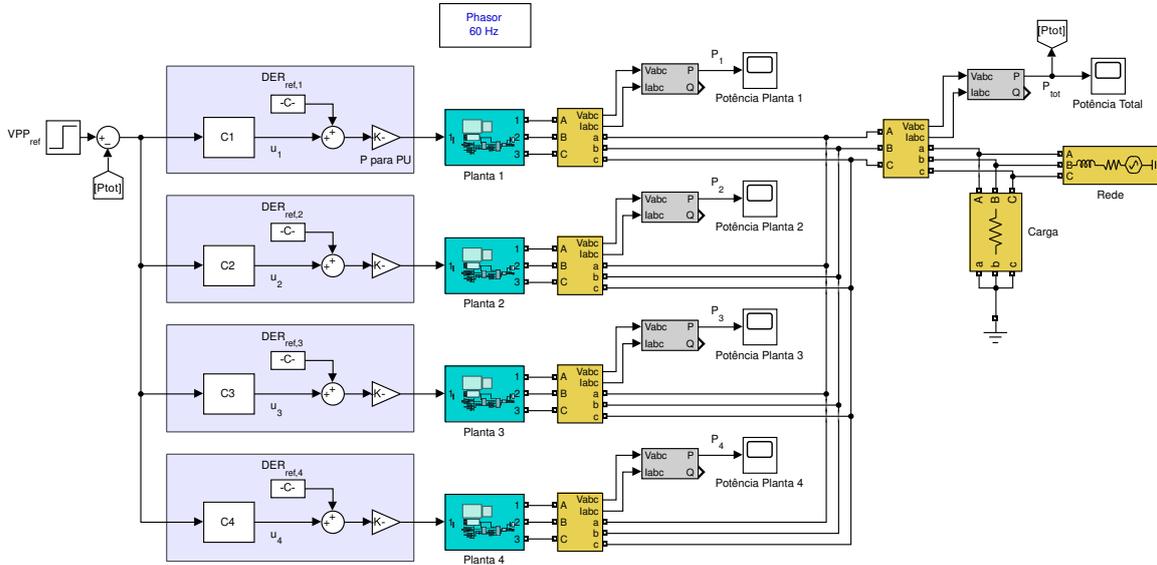
Os principais parâmetros da VPP estão apresentados na Tabela 1, em que as potências ativas nominais para as plantas fotovoltaicas são definidas conforme os valores das quatro DERs com as maiores potências despacháveis utilizadas em Elkhatab, Johnson e Schoenwald (2017). Além disso, os ganhos dos controladores de potência das plantas são ajustados arbitrariamente para fornecerem tempos de acomodação diferentes a cada uma delas.

A rede é representada por um equivalente de Thévenin com potência de curto circuito de 192 MVA e relação X/R de 10, com detalhamento apresentado no Apêndice B. Ainda, foram adotados parâmetros típicos, baseados nas faixas de valores sugeridas em Ellis, Behnke e Elliott (2013), para representação das plantas fotovoltaicas. Os parâmetros são descritos no Apêndice A.

## 5.3 CONTROLE DA USINA VIRTUAL DE ENERGIA

A sintonia matricial é utilizada para as três primeiras plantas fotovoltaicas (plantas 1, 2 e 3), enquanto a sequencial é empregada na planta 4 – de acordo com a estrutura

**Figura 13:** Sistema da usina virtual de energia implementado no Simulink®.



Fonte: do autor

vista na Figura 13. Com base na Subseção 5.1.1, assume-se que as plantas fotovoltaicas possam ser representadas por um sistema de segunda ordem; assim sendo, a seleção de controladores da estrutura PID (proporcional-integral-derivativo), na forma

$$C(z, \rho) = \rho^T \bar{C}(z) = \begin{bmatrix} k_P & k_I & k_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ z \\ \frac{z-1}{z} \end{bmatrix}, \quad (63)$$

é feita. Além disso, as referências base de potência ativa  $\{DER_{ref,i} \mid i \in [1, 4]\}$  – que geralmente são calculadas nos blocos de otimização e ajustadas no processador de redesenho, como apresentado na Figura 1 – serão definidas como valores constantes e equivalentes a 20% da potência nominal da respectiva planta fotovoltaica: isso se faz necessário uma vez que não é escopo do trabalho os cálculos para determinação de tais pontos de operação.

### 5.3.1 Projeto e Simulação com a Sintonia Matricial Conjunta

Consideram-se, para a sintonia, as plantas fotovoltaicas 1, 2 e 3 da Figura 13. É desejado que o sistema como um todo responda de forma similar a um sistema de primeira ordem, com tempo de acomodação em torno de 3 segundos – é visto no Apêndice C que as plantas fotovoltaicas atingem o regime permanente, em malha aberta, em torno de 3 a 7 segundos. A função de transferência desejada, no tempo discreto com período de amostragem de  $5 \text{ ms}^1$ , é dada por

$$T_d(z) = \frac{0,0066}{z - 0,9934}. \quad (64)$$

<sup>1</sup>De acordo com a Seção 5.1, é recomendado um período de integração de 1 a 10 milissegundos para as plantas fotovoltaicas baseadas no modelo de Ellis, Behnke e Elliott (2013).

**Tabela 1:** *Parâmetros de interesse do sistema da VPP.*

Subsistema	Parâmetro	Valor
Planta 1	Potência nominal	500 kW
	Tensão RMS nominal	13,8 kV
	Ganho proporcional de controle de potência (Kpg)	0,1 pu/pu
	Ganho integral de controle de potência (Kig)	0,5 pu/(pu · s)
Planta 2	Potência nominal	300 kW
	Tensão RMS nominal	13,8 kV
	Ganho proporcional de controle de potência (Kpg)	0,08 pu/pu
	Ganho integral de controle de potência (Kig)	0,40 pu/(pu · s)
Planta 3	Potência nominal	200 kW
	Tensão RMS nominal	13,8 kV
	Ganho proporcional de controle de potência (Kpg)	0,1 pu/pu
	Ganho integral de controle de potência (Kig)	0,7 pu/(pu · s)
Planta 4	Potência nominal	140 kW
	Tensão RMS nominal	13,8 kV
	Ganho proporcional de controle de potência (Kpg)	0,13 pu/pu
	Ganho integral de controle de potência (Kig)	0,65 pu/(pu · s)
Carga	Resistiva	1 GΩ
	Tensão RMS nominal	13,8 kV
Rede	Potência de curto circuito	192 MVA
	Relação X/R	10

Fonte: do autor

A partir de (47), a função laço desejada ao sistema pode ser calculada e assume a forma:

$$\mathcal{L}_T^d(z) = \frac{0,0066}{z - 1}. \quad (65)$$

Na sequência deve-se determinar arbitrariamente as funções laço individuais de cada ramo, desde que atendam a (48). Assim sendo, são definidos pesos para os ramos conforme a proporção de potência nominal, vistas na Tabela 1, que cada planta contribui para a usina virtual de energia, isto é,

$$\mathcal{L}_1^d(z) = \frac{500 \text{ kW}}{1 \text{ MW}} \cdot \mathcal{L}_T^d(z) = 0,5 \cdot \mathcal{L}_T^d(z) = \frac{0,0033}{z - 1}, \quad (66)$$

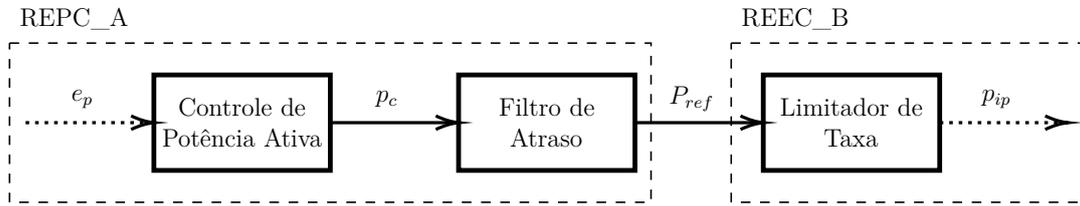
$$\mathcal{L}_2^d(z) = \frac{300 \text{ kW}}{1 \text{ MW}} \cdot \mathcal{L}_T^d(z) = 0,3 \cdot \mathcal{L}_T^d(z) = \frac{0,0020}{z - 1}, \quad (67)$$

$$\mathcal{L}_3^d(z) = \frac{200 \text{ kW}}{1 \text{ MW}} \cdot \mathcal{L}_T^d(z) = 0,2 \cdot \mathcal{L}_T^d(z) = \frac{0,0013}{z - 1}. \quad (68)$$

### 5.3.1.1 Plantas Fotovoltaicas com Controle Interno Linear de Potência Ativa

Define-se o presente cenário com o cálculo dos parâmetros dos controladores e a simulação do sistema considerando que as principais não linearidades que afetam o controle de potência ativa das plantas fotovoltaicas não ocorrem. As não linearidades incluem o filtro de atraso – implementado como um bloco de função de transferência de primeira ordem (LESAGE, 2022; ELLIS; BEHNKE; ELLIOTT, 2013) – e o limitador de taxa – bloco que limita, entre um valor máximo e mínimo, a taxa de variação do sinal de controle de potência ativa interno às plantas (LESAGE, 2022) – que estão representados na Figura 14. Os parâmetros modificados são mostrados na Tabela 2.

**Figura 14:** Diagrama de blocos do controle de potência ativa no sistema fotovoltaico genérico.



Fonte: adaptado de LeSage (2022)

Nota: Os sinais  $e_p$ ,  $p_c$  e  $p_{ip}$  têm suas nomenclaturas atribuídas pelo autor, uma vez que o modelo não fornece um nome específico para cada um. É importante ressaltar que  $p_{ip}$  atua na referência de comando de corrente  $I_{pcmd}$ , de acordo com a Figura 11, que por sua vez comanda a potência ativa de saída da planta.

**Tabela 2:** Parâmetros alterados das plantas fotovoltaicas para o controle interno linear.

Bloco	Parâmetro	Valor
Filtro de Atraso (REPC_A)	Tlag	0 s
Limitador de Taxa (REEC_B)	dPmax	$\infty$ pu/s
Limitador de Taxa (REEC_B)	dPmin	$-\infty$ pu/s

Fonte: do autor

Através de ensaios individuais com as três plantas, são coletados os dados da resposta de potência ativa para saltos de amplitude de 20% da potência nominal de cada uma – tais ensaios podem ser vistos na Figura 29 do Apêndice C.1. Esse conjunto de dados é utilizado para a determinação dos parâmetros dos compensadores a partir de (52), (53) e (54). Vale ressaltar que os filtros  $L_i(z)$ , normalmente considerados nos casos em que a classe de controladores escolhida é subparametrizada, não são empregados no presente cenário. Por fim, o vetor de ganhos  $\hat{\rho}$  obtido, que minimiza a função custo, resulta nos compensadores:

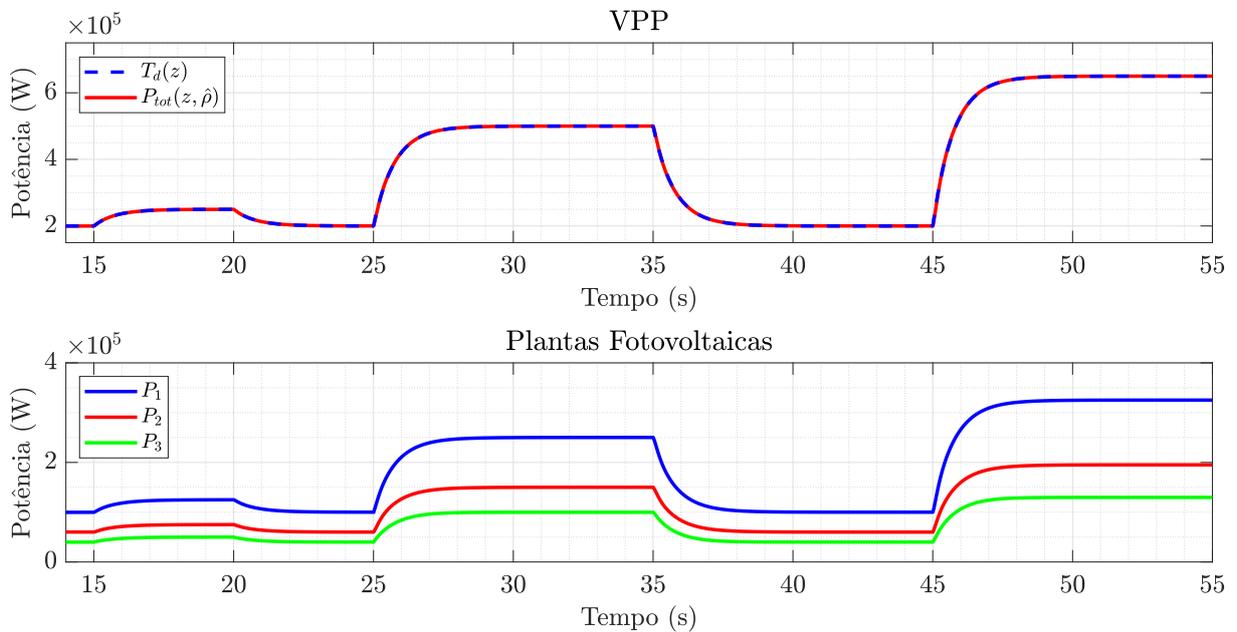
$$C_1(z, \hat{\rho}_1) = 1,1594 + 0,0033 \left[ \frac{z}{z-1} \right] + 8,8648 \left[ \frac{z-1}{z} \right], \quad (69)$$

$$C_2(z, \hat{\rho}_2) = 0,8951 + 0,0020 \left[ \frac{z}{z-1} \right] + 5,5273 \left[ \frac{z-1}{z} \right], \quad (70)$$

$$C_3(z, \hat{\rho}_3) = 0,3158 + 0,0013 \left[ \frac{z}{z-1} \right] + 6,7532 \left[ \frac{z-1}{z} \right]. \quad (71)$$

A simulação da usina virtual de energia em malha fechada com os controladores aplicados é apresentada na Figura 15, onde pode-se observar que o sistema se comporta de maneira idêntica ao desejado – representado pela  $T_d(z)$ , com tempo de acomodação em torno de 3 segundos – para saltos de amplitudes, na referência, de 5%, 30% e 45% da potência total da usina com as três plantas (1 MW). Ainda, os valores das potências individuais de cada planta também são mostrados, na qual acompanham o formato de um sistema de primeira ordem e estabilizam em torno do valor de referência da VPP ponderado pelos pesos de cada ramo; isto é, os pesos dados a cada laço determinam diretamente a contribuição que cada subsistema tem na usina.

**Figura 15:** Resultados da simulação da VPP (com as três plantas), com controle interno linear, em malha fechada – sintonizada matricialmente – para referências de saltos com três amplitudes diferentes.



Fonte: do autor

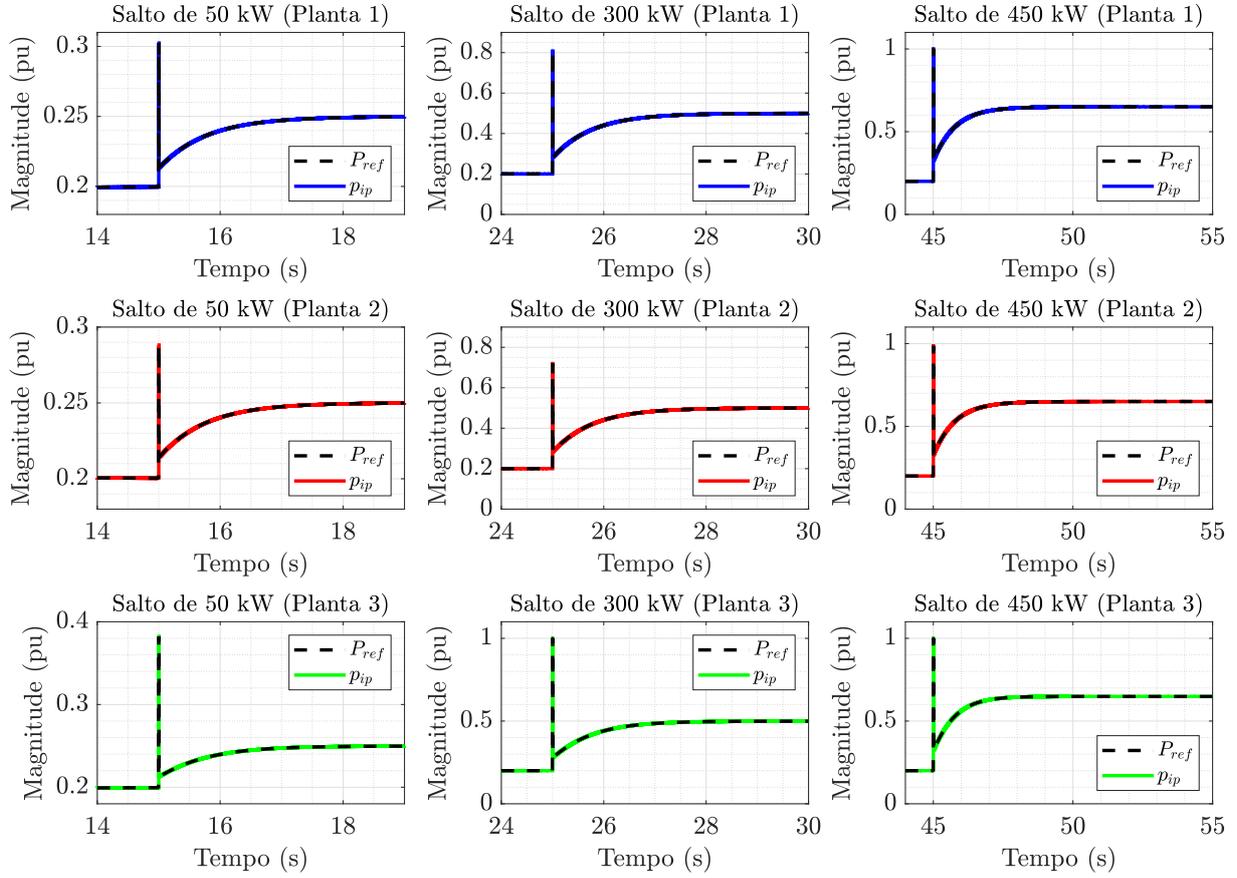
Os sinais de controle internos das três plantas fotovoltaicas, com base na Figura 14, são expostos na Figura 16 para os saltos aplicados na referência da VPP. Uma vez que o filtro de atraso e as limitações na taxa não estão ativos para nenhum dos subsistemas, é visto que os sinais da saída dos controladores internos de potência ativa<sup>2</sup> apresentam picos justamente no instante dos saltos da referência – tais picos garantem que a VPP responda de forma mais similar a um sistema de primeira ordem, como projetado. Ainda, os sinais  $p_{ip}$ , que geram os comandos de referência de corrente aos subsistemas, acompanham fielmente  $P_{ref}$  em todas as situações.

### 5.3.1.2 Plantas Fotovoltaicas com Controle Interno Não Linear de Potência Ativa

No presente cenário, o cálculo dos parâmetros dos controladores e a simulação do sistema é feito ao considerar que o filtro de atraso e o limitador de taxa, representados

<sup>2</sup>Já que o filtro de atraso não está ativo, então  $P_{ref} = p_e$ .

**Figura 16:** Resultados da simulação dos sinais de controle internos das três plantas, considerando o controle interno linear, para referências de saltos na VPP com três amplitudes diferentes.



Fonte: do autor

na Figura 14, estão empregados em cada uma das plantas fotovoltaicas. Os parâmetros modificados são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Parâmetros alterados das plantas fotovoltaicas para o controle interno não linear.

Bloco	Parâmetro	Valor
Filtro de Atraso (REPC_A)	Tlag	0,2 s
Limitador de Taxa (REEC_B)	dPmax	0,45 pu/s
Limitador de Taxa (REEC_B)	dPmin	-0,45 pu/s

Fonte: do autor

Por meio de ensaios individuais com as três plantas, são coletados os dados da resposta de potência ativa para saltos de amplitude de 20% da potência nominal de cada uma – tais ensaios podem ser vistos na Figura 30 do Apêndice C.2. Novamente, os conjuntos de dados são utilizados para a determinação dos parâmetros dos compensadores a partir de (52), (53) e (54). Desta forma, o vetor de ganhos  $\hat{\rho}$  obtido, sem a aplicação dos filtros  $L_i(z)$ , resulta nos compensadores:

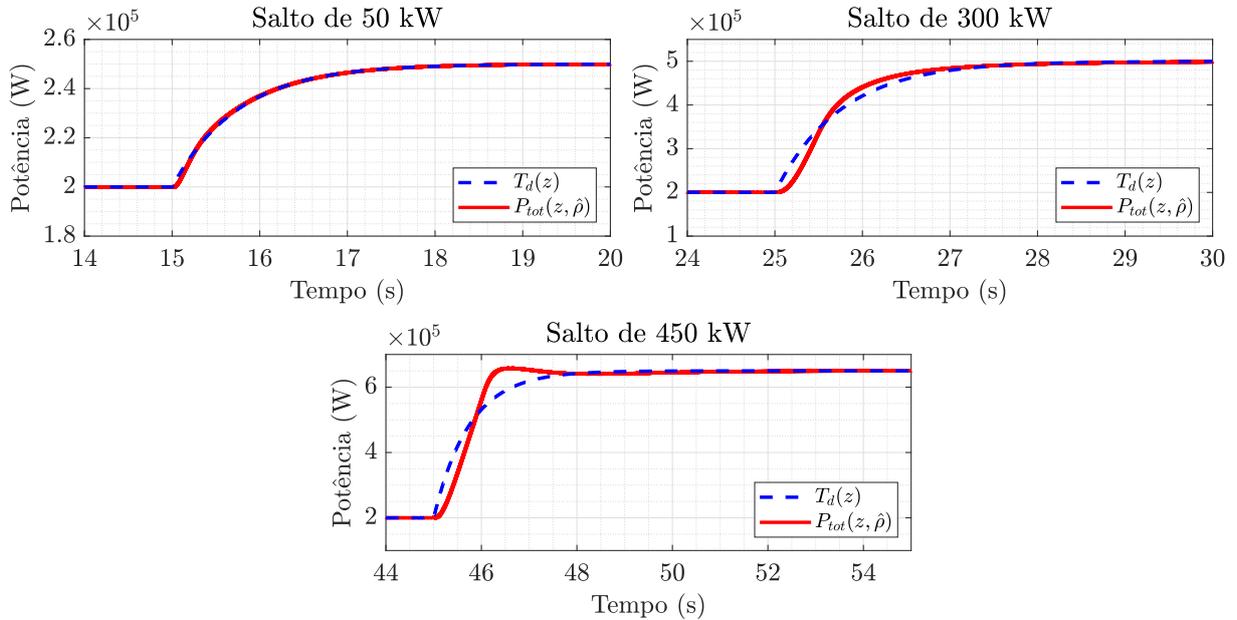
$$C_1(z, \hat{\rho}_1) = 1,1606 + 0,0033 \left[ \frac{z}{z-1} \right] + 60,8736 \left[ \frac{z-1}{z} \right], \quad (72)$$

$$C_2(z, \hat{\rho}_2) = 0,8955 + 0,0020 \left[ \frac{z}{z-1} \right] + 44,6418 \left[ \frac{z-1}{z} \right], \quad (73)$$

$$C_3(z, \hat{\rho}_3) = 0,3121 + 0,0013 \left[ \frac{z}{z-1} \right] + 22,5870 \left[ \frac{z-1}{z} \right]. \quad (74)$$

A simulação da usina virtual de energia em malha fechada com os controladores aplicados é apresentada na Figura 17. Percebe-se que as diferentes amplitudes de salto geram comportamentos distintos na resposta de potência da usina: saltos maiores fazem com que o sistema se comporte de acordo com um modelo de segunda ordem – diferentemente de como desejado no projeto ao considerar (64). Ainda, o salto de 450 kW causa um sobrepasso na potência ativa injetada à rede. Todavia, o tempo de acomodação é mantido praticamente igual ao almejado, em torno de 3 segundos.

**Figura 17:** Resultados da simulação da VPP (com as três plantas), com controle interno não linear, em malha fechada – sintonizada matricialmente – para referências de saltos com três amplitudes diferentes.

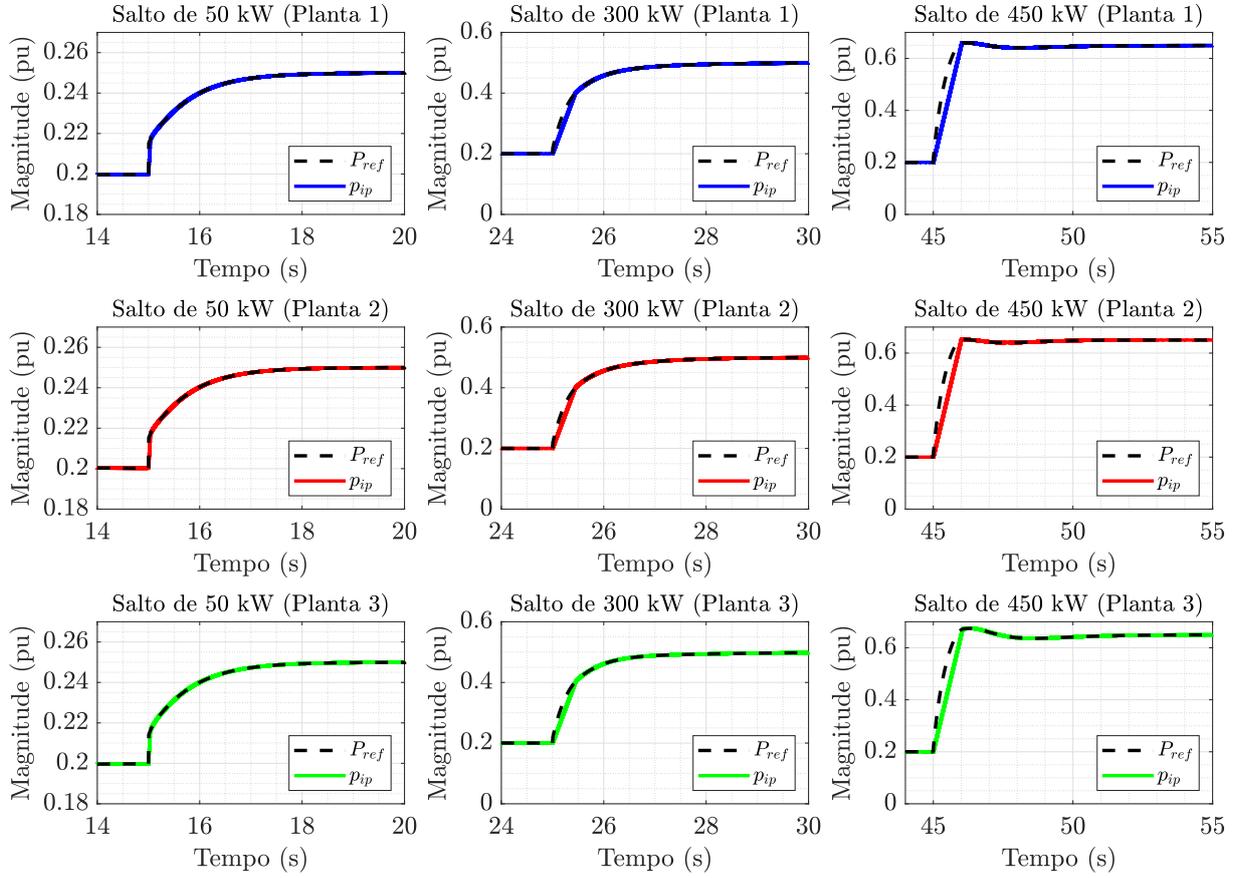


Fonte: do autor

A limitação no desempenho da VPP, em relação ao almejado no projeto, advém das não idealidades consideradas nos controles internos de potência ativa das plantas fotovoltaicas; essas seguindo a estrutura da Figura 14. A partir da Figura 18, nota-se que os picos, nos instantes dos saltos, não ocorrem – diferentemente de como é para o caso ideal presente na Figura 16 – devido aos filtros de atraso (implementados como um sistema de primeira ordem) que atuam como um passa-baixas. Ainda, os blocos de limitação da taxa fazem com que  $P_{ref} \neq p_{ip}$ , principalmente no salto de 450 kW no qual os sinais  $p_{ip}$  assumem o formato de uma reta (com inclinação de 0,45 pu/s) e não acompanham fielmente  $P_{ref}$ , e implicam na degradação das respostas de potência ativa das plantas e da usina.

As potências individuais de cada planta são mostradas na Figura 19, na qual acompanham, novamente, os formatos da potência total da VPP, mas ponderadas pelos pesos de cada ramo. É visto que o sobrepasso também é uma característica presente nas respostas das três plantas quando é aplicado um salto de 450 kW.

**Figura 18:** Resultados da simulação dos sinais de controle internos das três plantas, considerando o controle interno não linear, para referências de saltos na VPP com três amplitudes diferentes.



Fonte: do autor

### 5.3.1.3 Modelo de Referência de Segunda Ordem

Com o intuito de contornar a limitação no desempenho das respostas, devido às não idealidades, altera-se o modelo de referência da usina para um de segunda ordem, na forma

$$T_d^S(z) = \frac{5,296 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 0,992)(z - 0,9868)} \quad (75)$$

com tempo de acomodação em torno de 3 segundos, assim como é para (64). Ao aplicar (47), a função laço desejada é

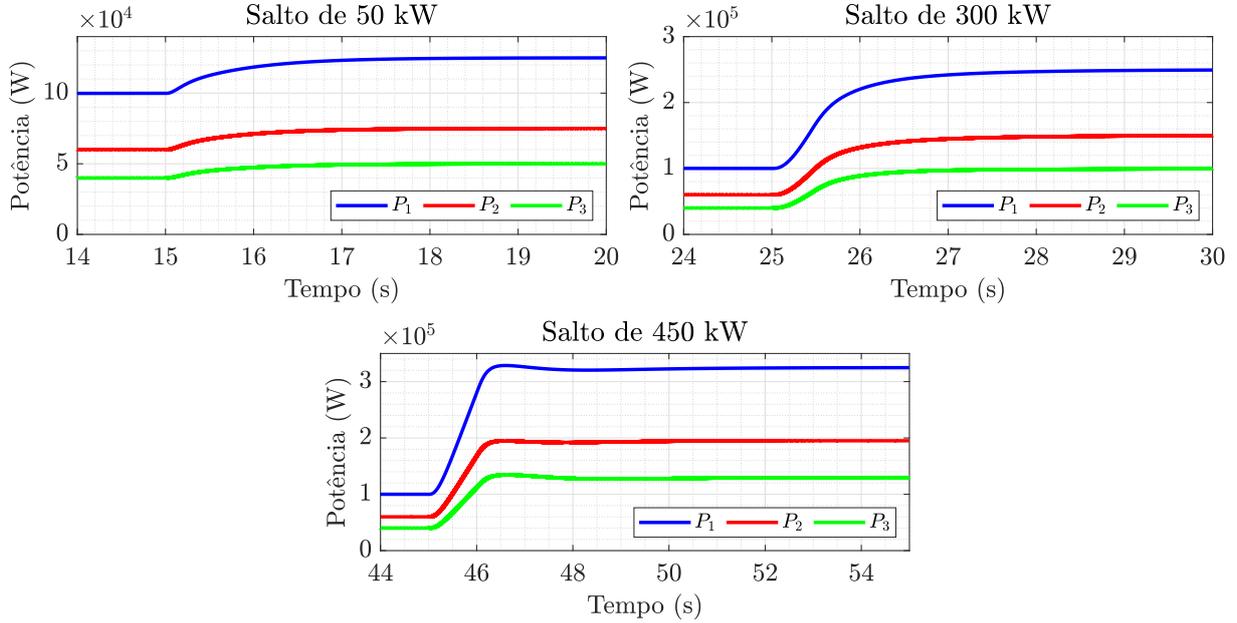
$$\mathcal{L}_{T_s}^d(z) = \frac{5,296 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 1)(z - 0,9788)}. \quad (76)$$

e considerando, mais uma vez, os pesos de cada ramo tem-se:

$$\mathcal{L}_{S_1}^d(z) = 0,5 \cdot \mathcal{L}_{T_s}^d(z) = \frac{2,648 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 1)(z - 0,9788)}, \quad (77)$$

$$\mathcal{L}_{S_2}^d(z) = 0,3 \cdot \mathcal{L}_{T_s}^d(z) = \frac{1,5888 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 1)(z - 0,9788)}, \quad (78)$$

**Figura 19:** Resultados da simulação das potências ativas de cada planta fotovoltaica, com controle interno não linear, para referências de saltos com três amplitudes diferentes.



Fonte: do autor

$$\mathcal{L}_{S_3}^d(z) = 0,2 \cdot \mathcal{L}_{T_S}^d(z) = \frac{1,0592 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 1)(z - 0,9788)}. \quad (79)$$

Novamente, a partir das equações<sup>3</sup> (52), (53) e (54) e com as bateladas de dados dos ensaios, presentes no Apêndice C.2, os controladores definidos são:

$$C_1^S(z, \hat{\rho}_1) = 0,7577 + 0,0025 \left[ \frac{z}{z-1} \right] + 9,2513 \left[ \frac{z-1}{z} \right], \quad (80)$$

$$C_2^S(z, \hat{\rho}_2) = 0,6029 + 0,0015 \left[ \frac{z}{z-1} \right] + 5,0471 \left[ \frac{z-1}{z} \right], \quad (81)$$

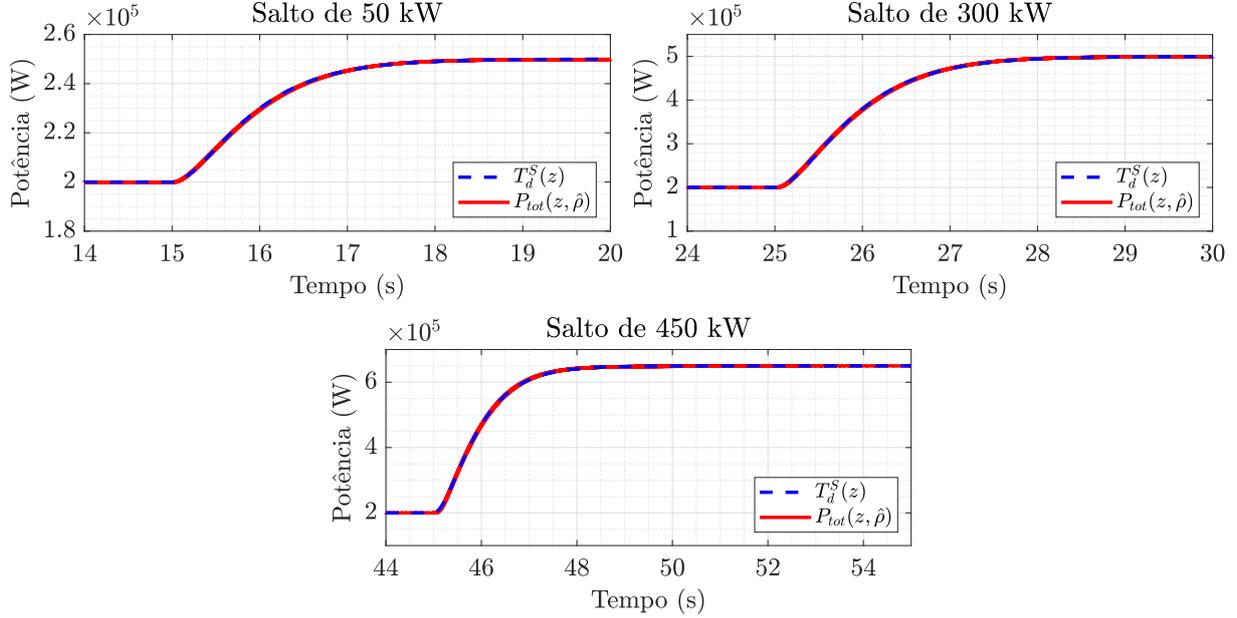
$$C_3^S(z, \hat{\rho}_3) = 0,1962 + 0,0010 \left[ \frac{z}{z-1} \right] + 6,2195 \left[ \frac{z-1}{z} \right]. \quad (82)$$

As respostas da usina virtual de energia são apresentadas na Figura 20, na qual é perceptível que a potência total gerada segue o modelo de referência de segunda ordem desejado, para as três amplitudes de saltos. Em virtude do projeto considerar um modelo de ordem dois, nota-se que os sinais internos das plantas,  $p_{ip}$ , seguem devidamente cada  $P_{ref}$  na Figura 21; isto é, não são limitados pelo valor máximo da taxa já que as curvas dos sinais  $P_{ref}$  têm derivadas menores, que recaem dentro da faixa de valores admissível.

Apesar de que para os três saltos considerados a resposta de potência ativa da VPP se comporta da maneira desejada, isso não é garantido para todas as amplitudes possíveis: basta que o salto aplicado seja exigente o suficiente para ter seu desempenho afetado pela faixa de limitação de taxa das plantas. Desta forma, é recomendado que os projetos também levem em consideração as amplitudes das referências aplicadas ao sistema, além de determinar o modelo de referência desejado, principalmente quanto ao formato e tempo de acomodação. Dessa forma, pode-se concluir que o modelo de referência de segunda

<sup>3</sup>Sem a utilização dos filtros  $L_i(z)$ .

**Figura 20:** Resultados da simulação da VPP (com as três plantas), com controle interno não linear e modelo de referência de segunda ordem para a usina, em malha fechada – sintonizada matricialmente – para referências de saltos com três amplitudes diferentes.



Fonte: do autor

ordem é melhor para o presente estudo. No entanto, saltos maiores do que os considerados, que atinjam as não linearidades das plantas, ainda podem ter seu desempenho degradado.

### 5.3.2 Projeto e Simulação com a Sintonia Sequencial

A sintonia do compensador da planta 4, da Figura 13, para o emprego na VPP é feita a partir do projeto por meio da Sintonia Sequencial da Seção 4.1: tal sintonia é recomendada quando almeja-se a inclusão de uma planta adicional em um sistema já existente. O requisito necessário ao projeto é que  $\mathcal{T}_s\{T_d^{SQ}(z)\} < \mathcal{T}_s\{T_d^S(z)\}$ <sup>4</sup>, em que  $T_d^{SQ}(z)$  é a função de transferência para o modelo de referência da sintonia sequencial. Dessa maneira, define-se a função de transferência desejada para a VPP, com as quatro plantas fotovoltaicas, como:

$$T_d^{SQ}(z) = \frac{5,6472 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 0,9896)(z - 0,9892)}, \quad (83)$$

em que o tempo de acomodação é em torno de 2,7 segundos. Logo, por meio de (26), (76) e (83), tem-se

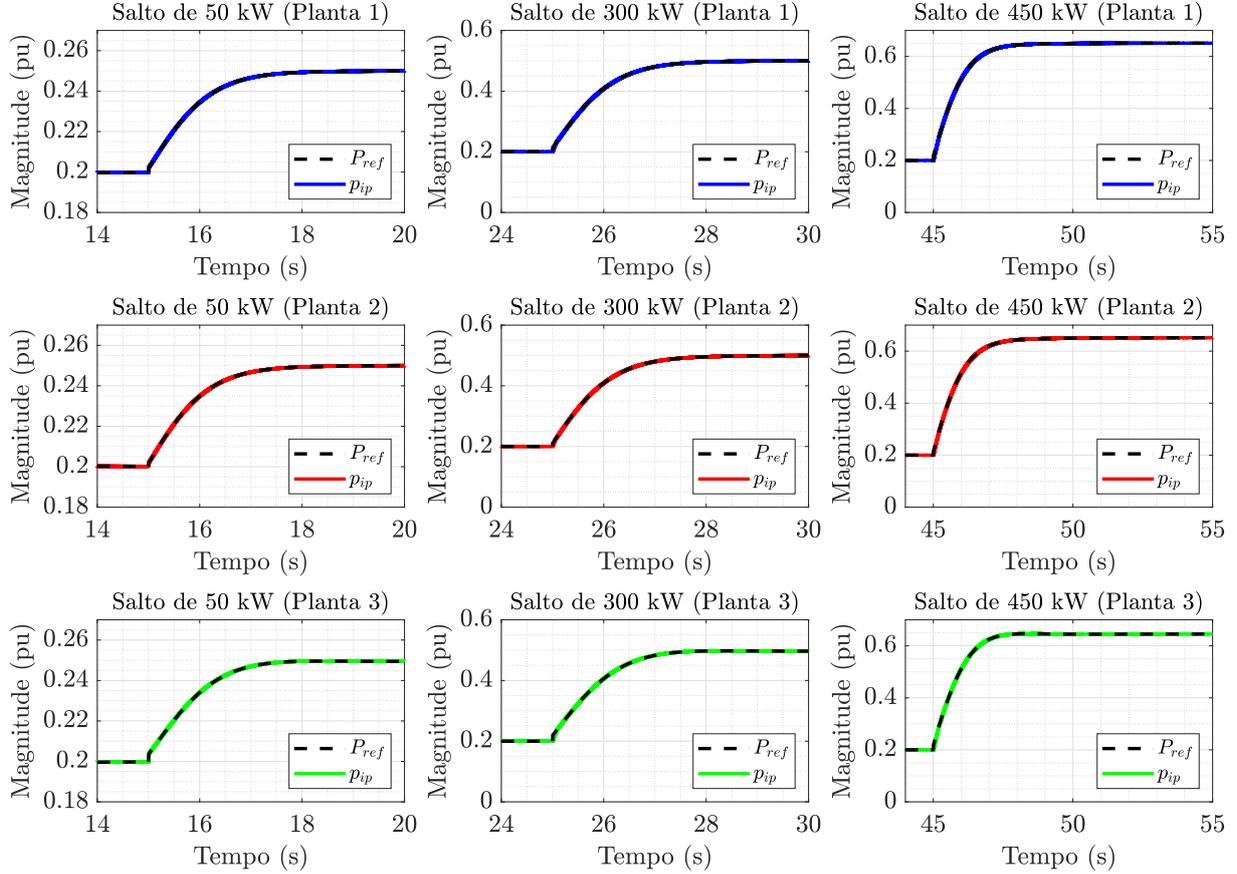
$$\mathcal{L}_{SQ_4}^d(z) = \left[ \frac{T_d^{SQ}(z)}{1 - T_d^{SQ}(z)} \right] - \mathcal{L}_{T_s}^d(z) = \frac{3,5125 \cdot 10^{-6}(z + 0,9929)}{(z - 1)(z - 0,9788)}, \quad (84)$$

e a função de transferência resultante para a sintonia virtual é, com base em (27),

$$T_d^{SV}(z) = \frac{3,5125 \cdot 10^{-6}(z + 0,9929)}{(z - 0,9997)(z - 0,9792)}. \quad (85)$$

<sup>4</sup>Na qual o símbolo  $\mathcal{T}_s$  representa o tempo de acomodação e a justificativa desse requisito consta na Seção 4.1.

**Figura 21:** Resultados da simulação dos sinais de controle internos das três plantas, considerando o controle interno não linear e modelo de referência de segunda ordem para a usina, para referências de saltos na VPP com três amplitudes diferentes.



Fonte: do autor

A partir da aplicação do método VRFT, considerando os ensaios da planta 4 do Apêndice C.2, obtém-se o vetor  $\hat{\rho}^{SQ}$  que resulta no controlador:

$$C_4^{SQ}(z, \hat{\rho}^{SQ}) = 0,0708 + 0,0003 \left[ \frac{z}{z-1} \right] + 1,2702 \left[ \frac{z-1}{z} \right]. \quad (86)$$

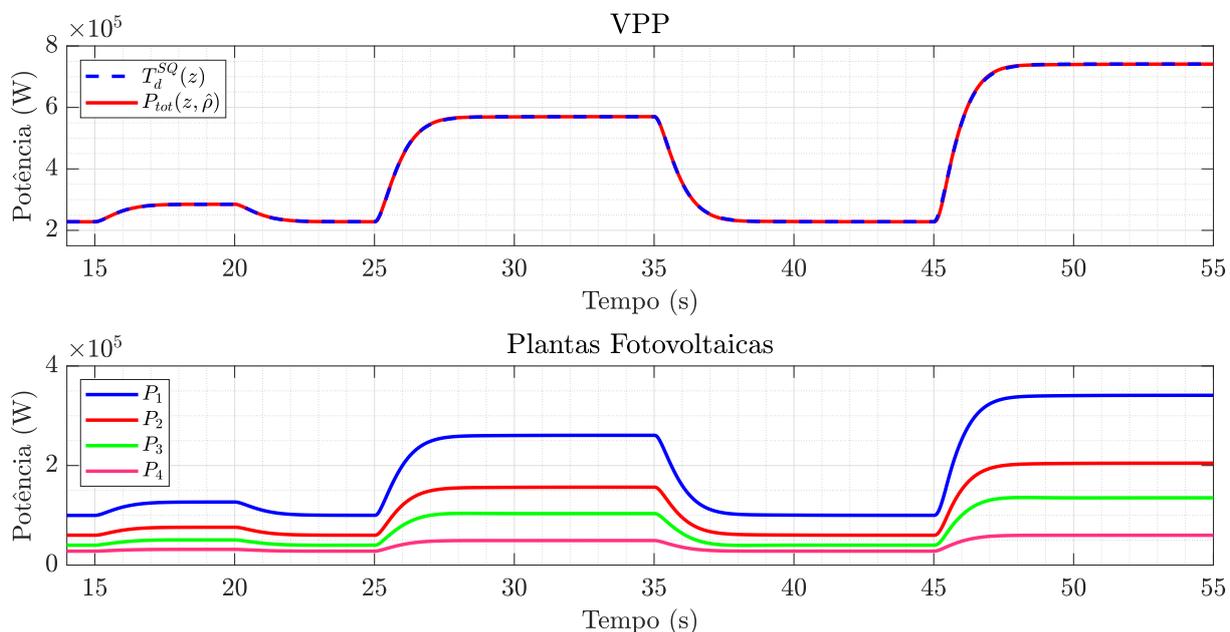
A simulação da usina em malha fechada com os quatro controladores aplicados<sup>5</sup> é apresentada na Figura 22. Mais uma vez são considerados saltos, na referência, com amplitudes de 5%, 30% e 45% da potência total da usina, mas com as quatro plantas (1,14 MW). É perceptível que a VPP consegue seguir o modelo de referência desejado,  $T_d^{SQ}(z)$ , para as três referências em análise e, conseqüentemente, acomoda-se aproximadamente em 2,7 s.

Todavia, caso seja aplicado um salto com amplitude maior<sup>6</sup>, como mostrado na Figura 23, a resposta não é igual à projetada: nota-se que há uma oscilação antes de se acomodar. Isso é decorrente, como esperado, dos sinais de controle internos das plantas que são limitados principalmente quanto à taxa máxima, de acordo com a Figura 24. Portanto, recomenda-se, novamente, que o projeto leve em consideração as referências de interesse as quais a VPP deve seguir e defina-se um tempo de acomodação compatível. Sugere-se,

<sup>5</sup>Esses sendo  $C_1^S(z, \hat{\rho}_1)$ ,  $C_2^S(z, \hat{\rho}_2)$ ,  $C_3^S(z, \hat{\rho}_3)$  e  $C_4^{SQ}(z, \hat{\rho}^{SQ})$ .

<sup>6</sup>Este salto equivale a 65% da potência nominal da VPP – que é 1,14 MW considerando as quatro plantas.

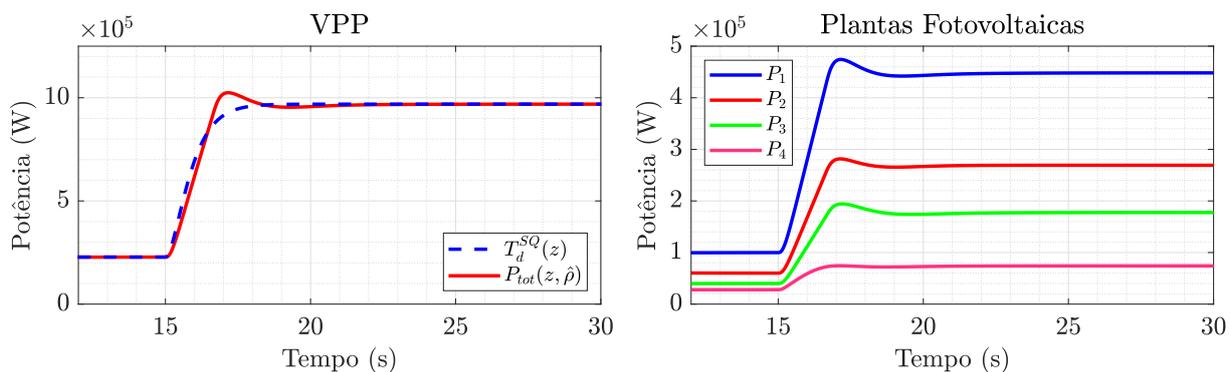
**Figura 22:** Resultados da simulação da VPP (com as quatro plantas) em malha fechada – sintonizada sequencialmente – para referências de saltos com três amplitudes diferentes.



Fonte: do autor

como trabalhos futuros, o projeto de um novo modelo de referência menos exigente – isto é, tempo de acomodação maior – ou, ainda, realizar um estudo sobre a definição e distribuição eficiente (quanto aos pesos) das funções laço, com o intuito de evitar a excitação das não linearidades das plantas fotovoltaicas.

**Figura 23:** Resultados da simulação da VPP (com as quatro plantas) em malha fechada – sintonizada sequencialmente – para referência de salto de 741 kW.

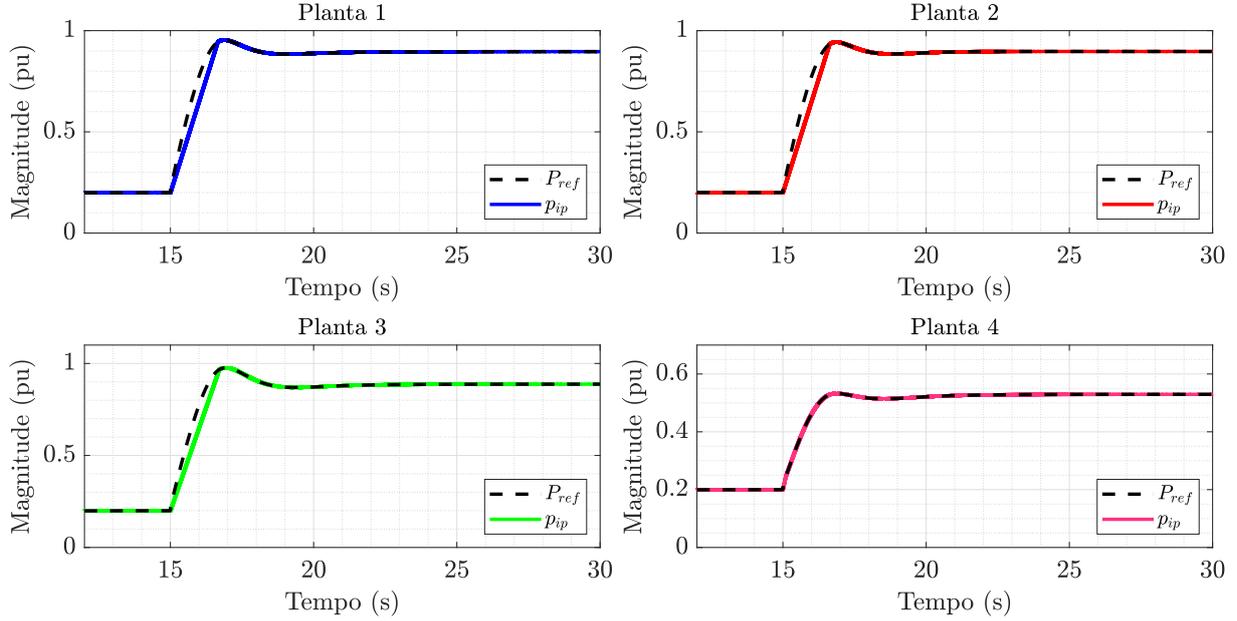


Fonte: do autor

### Cenário de Desconexão da Planta 1

A usina virtual de energia é testada para a situação crítica de desconexão da planta 1, que é a planta com maior potência de despacho na VPP; entende-se esse cenário como

**Figura 24:** Resultados da simulação dos sinais de controle internos das quatro plantas para referência de salto de 741 kW.



Fonte: do autor

o de uma falha. Desta forma, com base em (48), (78), (79) e (84), a função laço geral resultante à VPP em falha, tendo em vista o projeto, é

$$\mathcal{L}_f^d(z) = \mathcal{L}_{S_2}^d(z) + \mathcal{L}_{S_3}^d(z) + \mathcal{L}_{SQ_4}^d(z) = \frac{2,9992 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 1)(z - 0,9788)} \quad (87)$$

e a função de transferência esperada, utilizando (27), é

$$T_d^f(z) = \frac{\mathcal{L}_f^d(z)}{1 + \mathcal{L}_f^d(z)} = \frac{2,9992 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 0,9966)(z - 0,9822)} \quad (88)$$

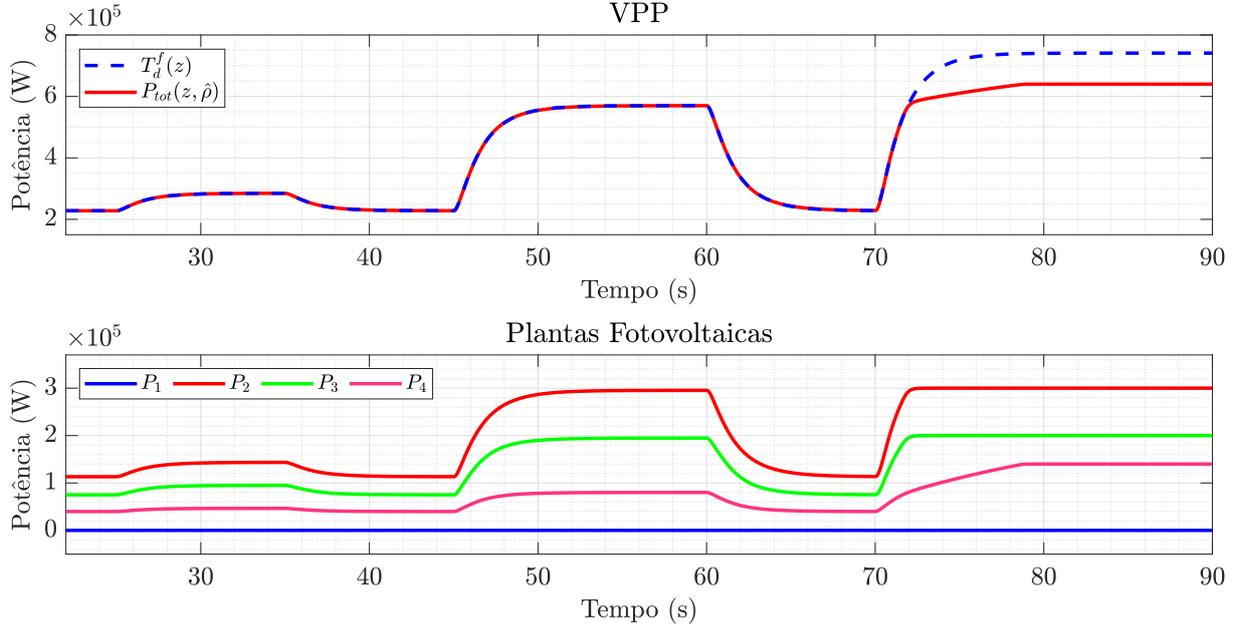
com tempo de acomodação em torno de 6,1 s. Já que o projeto foi realizado considerando os quatro laços e neste presente cenário a planta 1 não atua, é de se esperar um tempo de acomodação maior, ou seja, uma resposta mais lenta se comparada a (83).

Como mostrado nos gráficos da Figura 25, a potência total consegue seguir a referência para os dois primeiros saltos, no entanto, o mesmo não é válido para o último: vê-se que as plantas fotovoltaicas atingem o máximo de suas potências – isto é, suas potências nominais – e a VPP satura, não atingindo a referência. Conclui-se que como os controladores ativos são do tipo PID (possuem integradores), a referência é capaz de ser seguida – considerando a faixa de potência máxima despachável de cada planta fotovoltaica – mesmo com a falha de um ou mais laços, no entanto, o desempenho é degradado em relação ao tempo de acomodação.

### 5.3.3 Projeto e Simulação com Outras Estruturas de Controladores

Considerando um cenário similar ao presente em Elkhatib, Johnson e Schoenwald (2017), em que foram utilizados um controlador do tipo PID e o restante do tipo P para

**Figura 25:** Resultados da simulação da VPP em malha fechada, para referências de saltos com três amplitudes diferentes, com desconexão da planta 1.



Fonte: do autor

os DERs, são considerados compensadores das mesmas estruturas para a usina em atual estudo. Assim sendo, a planta 1 será comandada por um PID, enquanto as plantas 2, 3 e 4 serão por um P, na forma

$$C_P(z, \rho) = \rho^T \bar{C}_P(z) = [k_P] [1]. \quad (89)$$

A partir da Sintonia Matricial Conjunta e com o mesmo modelo de referência de (75), os ganhos dos compensadores podem ser determinados. Uma vez que a potência nominal da VPP é de 1,14 MW, os laços desejados, considerando (76), são obtidos da seguinte maneira:

$$\mathcal{L}_1^d(z) = \frac{500 \text{ kW}}{1,14 \text{ MW}} \cdot \mathcal{L}_{T_s}^d(z) = \frac{2,3228 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 1)(z - 0,9788)}, \quad (90)$$

$$\mathcal{L}_2^d(z) = \frac{300 \text{ kW}}{1,14 \text{ MW}} \cdot \mathcal{L}_{T_s}^d(z) = \frac{1,3937 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 1)(z - 0,9788)}, \quad (91)$$

$$\mathcal{L}_3^d(z) = \frac{200 \text{ kW}}{1,14 \text{ MW}} \cdot \mathcal{L}_{T_s}^d(z) = \frac{9,2912 \cdot 10^{-6}(z + 0,9929)}{(z - 1)(z - 0,9788)}, \quad (92)$$

$$\mathcal{L}_4^d(z) = \frac{140 \text{ kW}}{1,14 \text{ MW}} \cdot \mathcal{L}_{T_s}^d(z) = \frac{6,5038 \cdot 10^{-6}(z + 0,9929)}{(z - 1)(z - 0,9788)}. \quad (93)$$

A partir de (52), (53) e (54) e com as bateladas de dados dos ensaios, presentes no Apêndice C.2, os controladores definidos são:

$$C_1(z, \hat{\rho}_1) = 0,6654 + 0,0022 \left[ \frac{z}{z - 1} \right] + 8,2665 \left[ \frac{z - 1}{z} \right], \quad (94)$$

$$C_2(z, \hat{\rho}_2) = 2,1716, \quad (95)$$

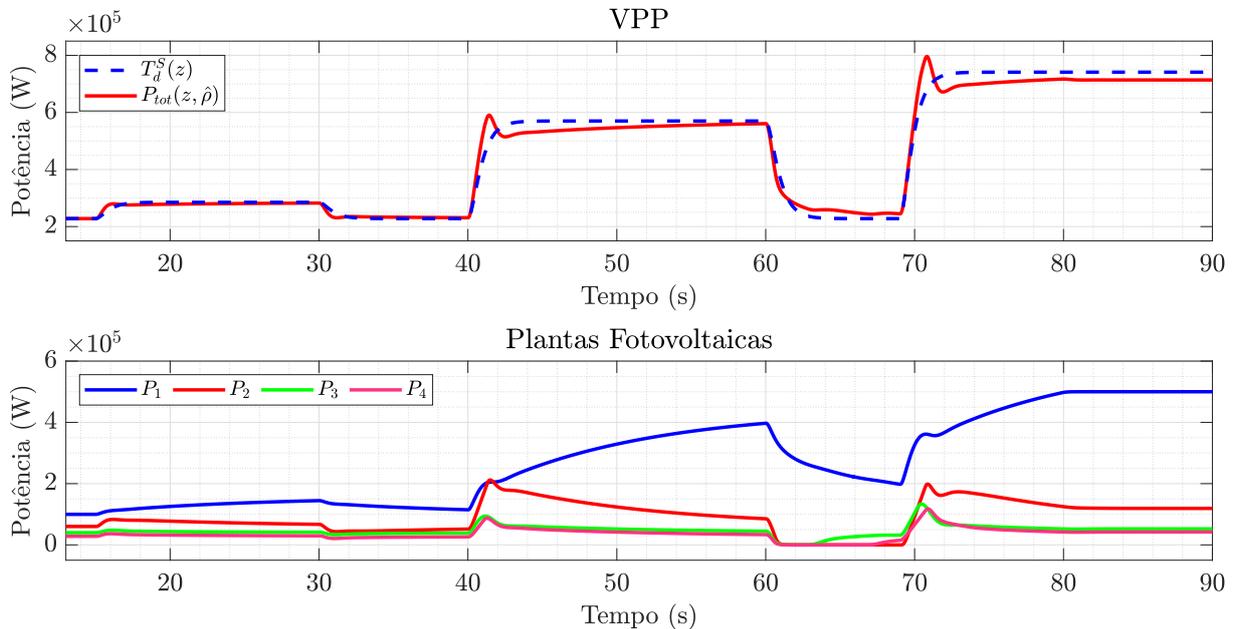
$$C_3(z, \hat{\rho}_3) = 0,4573, \quad (96)$$

$$C_4(z, \hat{\rho}_4) = 0,5231. \quad (97)$$

Vale ressaltar que utilizam-se os filtros  $L_i(z)$ , calculados de acordo com (50), já que os controladores do tipo P podem não pertencer à classe ideal de compensadores que realiza a sintonia ideal no método VRFT.

A simulação da usina em malha fechada com os quatro controladores aplicados está presente na Figura 26. É perceptível que a VPP não responde de maneira igual ao modelo de referência desejado,  $T_d^S(z)$ , principalmente para os saltos maiores: o tempo de acomodação é maior do que o projetado – uma vez que apenas há um controlador com o integrador,  $C_1(z, \hat{\rho}_1)$ , e o respectivo ganho desse componente é pequeno se comparado aos outros valores – e há sobrepasso. Além disso, é visto que a potência total satura para o último salto e não alcança-se a referência:  $P_1$  atinge a sua potência nominal (500 kW) já que é controlada pelo PID, ou seja, o compensador é capaz de acumular o sinal de erro enquanto as das outras plantas não. Em regime permanente, isso faz com que a planta 1 tenha que contribuir de forma expressiva para manter o erro de potência ativa total nulo, enquanto as outras plantas são limitadas aos seus respectivos valores base de referência<sup>7</sup>.

**Figura 26:** Resultados da simulação da VPP em malha fechada, para referências de saltos com três amplitudes diferentes, utilizando controladores dos tipos PID e P.



Fonte: do autor

### Cenário de Desconexão da Planta 1

A VPP é testada para a situação crítica de desconexão da planta 1 contendo os compensadores de (94), (95), (96) e (97). Então, com base em (48), (91), (92) e (93), a

<sup>7</sup>Esses sendo os  $\{DER_{ref,i} \mid i \in [1, 4]\}$  definidos como 20% da potência nominal da respectiva planta.

função laço geral resultante à VPP em falha, tendo em vista o projeto, é dada por

$$\mathcal{L}_f^d(z) = \mathcal{L}_2^d(z) + \mathcal{L}_3^d(z) + \mathcal{L}_4^d(z) = \frac{2,9732 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 1)(z - 0,9788)} \quad (98)$$

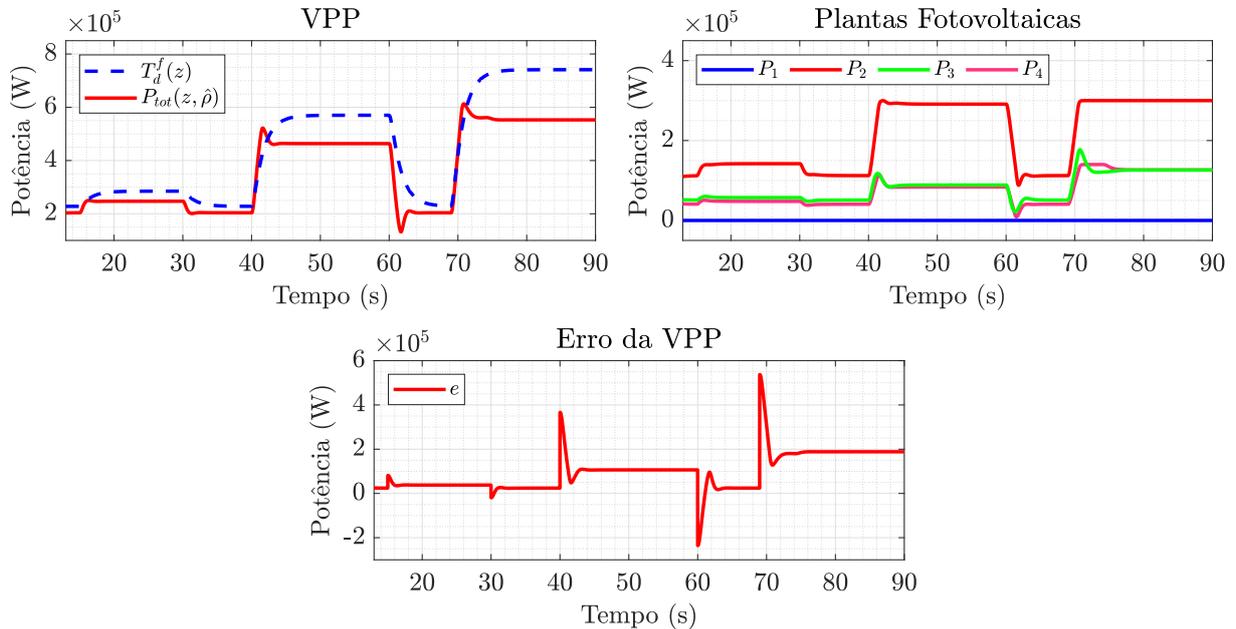
e a função de transferência esperada, utilizando (27), é

$$T_d^f(z) = \frac{\mathcal{L}_f^d(z)}{1 + \mathcal{L}_f^d(z)} = \frac{2,9732 \cdot 10^{-5}(z + 0,9929)}{(z - 0,9967)(z - 0,9822)} \quad (99)$$

com tempo de acomodação em torno de 6,2s.

Como mostrado nos gráficos da Figura 27, a potência total não é capaz de seguir as referências do tipo salto desejadas ao sistema, uma vez que o ramo que contém o controlador com integrador não está atuando. Portanto, o sinal de erro da VPP, que é enviado aos compensadores, não tende à zero após os saltos e causa a acomodação das potências de cada planta em valores diferentes dos definidos para  $\{\text{DER}_{ref,i} \mid i \in [1, 4]\}$ . Comprova-se, então, que não é recomendado utilizar apenas um único compensador que contenha o termo integrador, pois a usina torna-se totalmente dependente desse, e conseqüentemente da planta, para ser capaz de atingir as referências solicitadas.

**Figura 27:** Resultados da simulação da VPP em malha fechada com desconexão da planta 1, para referências de saltos com três amplitudes diferentes, utilizando controladores dos tipos PID e P.



Fonte: do autor

## 6 CONCLUSÃO

A aplicação de um método de controle baseado em dados, mais especificamente o método VRFT, para a sintonia dos compensadores de uma usina virtual de energia, com o objetivo de controlar a potência ativa total do sistema, foi tema do presente trabalho. Uma vez que o VRFT é idealizado para a sintonia de um controlador em uma malha única, elaborou-se dois procedimentos para a sintonia dos controladores nos ramos paralelos utilizando tal método: Sintonia Sequencial e Sintonia Matricial Conjunta. A Sintonia Sequencial requer que o projetista defina um modelo de referência desejado ao sistema na inclusão de cada controlador dos ramos, de forma sequencial. Dessa maneira, pode ser feita de forma iterativa e é recomendada quando deseja-se adicionar novos controladores a um sistema já existente. Já a Sintonia Matricial Conjunta considera a definição de um modelo de referência que é dividido, à cargo do projetista, para cada um dos ramos e calculam-se os ganhos dos controladores de forma conjunta, a partir de uma única minimização. É importante destacar que cada metodologia apresenta particularidades próprias, principalmente quanto às definições dos modelos de referência e forma de distribuição das funções laço, as quais o projetista deve se atentar.

Por meio de simulações na VPP formada por quatro plantas fotovoltaicas, baseadas no modelo genérico de Ellis, Behnke e Elliott (2013) e implementadas por LeSage (2022) no Simulink®, as duas metodologias propostas para a determinação dos parâmetros dos compensadores foram validadas. Escolheu-se controladores do tipo PID uma vez que é assumido que as plantas fotovoltaicas apresentem uma dinâmica de segunda ordem. Utilizou-se a Sintonia Matricial Conjunta para a sintonia dos controladores das plantas 1, 2 e 3 tendo em vista dois cenários: plantas fotovoltaicas com propriedades lineares e não lineares quanto ao controle interno de suas potências – já que possuem filtros de atraso e limitadores de taxa nos sinais de interesse. O sistema respondeu de forma igual à desejada, com o modelo de referência de primeira ordem, quando tais não linearidades estavam desativadas; todavia, com a presença delas, a resposta apresentou sobrepasso. Dessa maneira, foi proposta a utilização de um modelo de referência de segunda ordem à VPP, na qual a potência ativa total seguiu a dinâmica almejada para três saltos – com amplitudes de 5%, 30% e 45% da capacidade total de potência com as três plantas – na referência da usina. O controlador da planta 4 teve sua sintonia realizada por meio da Sintonia Sequencial, em que definiu-se outro modelo de referência de segunda ordem, mas ligeiramente mais rápido, e a potência ativa injetada à rede atingiu o desempenho desejado. No entanto, para um salto de 65% da potência nominal da usina, a resposta foi degradada ao apresentar sobrepasso. Logo, recomenda-se que os projetos levem em consideração todas as referências de interesse as quais a VPP deve seguir e definam-se tempos de acomodação compatíveis.

O desempenho da usina virtual de energia também foi avaliado ao considerar outras estruturas de controladores, similar ao estabelecido em Elkhatib, Johnson e Schoenwald (2017): um PID, para a planta 1, e proporcionais, para as plantas 2, 3 e 4. A VPP não

respondeu de maneira igual ao modelo de referência desejado, apresentando uma resposta lenta e com sobrepasso. Além disso, houve a saturação da resposta já que atingiu-se o máximo nominal da planta 1. Também foi considerado o cenário de desconexão da planta 1, onde o sistema não foi capaz de seguir as referências de entrada – uma vez que o controlador com integrador não estava ativo – e ficou limitado ao despacho de potência ativa baseado apenas no valor do erro, que não se tornou nulo, recebido pelos controladores. Comprovou-se, então, a dependência do sistema ao laço que implementa o controlador que contém o integrador e, conseqüentemente, recomenda-se que mais de um único ramo implemente tal estrutura; ademais, deve-se atentar à escolha das estruturas de compensadores que sejam capazes de atender aos requisitos dos projetos.

Por fim, esta monografia abre caminho para estudos futuros relacionados ao projeto considerando um modelo de referência menos exigente – isto é, tempo de acomodação maior – e que atenda a todas as referências de interesse, além de realizar um estudo sobre a definição e distribuição eficiente (quanto aos pesos) das funções laço, com o intuito de evitar a excitação das não linearidades das plantas fotovoltaicas. A utilização de plantas com dinâmicas consideravelmente diferentes deve ser realizada, o que impacta nos requisitos de projeto para cada um dos laços. Quanto aos controladores, a aplicação de compensadores LPV pode ser uma solução para o controle dos sistemas que apresentam não linearidades. Sugere-se, também, a formulação matemática da função custo, com base no sistema em malha fechada com os ramos paralelos, que inclua termos de correção para sintonias prévias insatisfatórias, isto é, que a adição de novos ramos seja capaz de corrigir o desempenho não alcançado por sintonias anteriores.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, F. M. DE. *Estudo para aplicação de usinas virtuais de energia no Brasil*. 2022. Monografia (Trabalho de conclusão de graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ASHOURIAN, H.; GRAS, H. *WECC PV park model*. [S.l.], 2022. Disponível em: <[https://www.emtp.com/documents/EMTP%5C%20Documentation/doc/Renewables/WECC\\_PV\\_Park\\_Models.pdf](https://www.emtp.com/documents/EMTP%5C%20Documentation/doc/Renewables/WECC_PV_Park_Models.pdf)>.
- BAKEER, A. et al. A sophisticated modeling approach for photovoltaic systems in load frequency control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 134, p. 107330, 2022. ISSN 0142-0615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107330>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206152100569X>>.
- BAZANELLA, A. S.; CAMPESTRINI, L.; ECKHARD, D. *Data-driven Controller Design: The H<sub>2</sub> Approach*. Netherlands: Springer, 2012. n/a. DOI: 10.1007/978-94-007-2300-9.
- BAZANELLA, A. S.; GOMES DA SILVA JR., J. M. *Sistemas de Controle: Princípios e Métodos de Projeto*. [S.l.]: Editora da UFRGS, 2005.
- CAMPI, M.; LECCHINI, A.; SAVARESI, S. Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers. *Automatica*, v. 38, n. 8, p. 1337–1346, 2002. ISSN 0005-1098. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(02\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(02)00032-8). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109802000328>>.
- CORLETA, A. et al. Data-driven control design applied to uninterruptible power supplies. In: 2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA). [S.l.: s.n.], 2016. P. 1312–1317. DOI: 10.1109/CCA.2016.7587988.
- DALL'ANESE, E. et al. Optimal Regulation of Virtual Power Plants. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 33, n. 2, p. 1868–1881, 2018. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2741920.
- ELKHATIB, M.; JOHNSON, J.; SCHOENWALD, D. Virtual Power Plant Feedback Control Design for Fast and Reliable Energy Market and Contingency Reserve Dispatch. In: 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). [S.l.: s.n.], 2017. P. 2969–2974. DOI: 10.1109/PVSC.2017.8366393.
- ELLIS, A.; BEHNKE, M. R.; ELLIOTT, R. T. Generic solar photovoltaic system dynamic simulation model specification, out. 2013. DOI: 10.2172/1177082. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/1177082>>.
- ESIG. *Generic Models (PV Plants)*. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <[https://www.esig.energy/wiki-main-page/generic-models-pv-plants/%5C#cite\\_note-1](https://www.esig.energy/wiki-main-page/generic-models-pv-plants/%5C#cite_note-1)>.

- FERNANDES, W. D. *Concepção de Usinas Virtuais de Energia no Sistema Elétrico Brasileiro: uma Abordagem através da Resposta à Demanda*. 2022. Monografia (Trabalho de conclusão de graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- HÄBERLE, V. et al. Control Design of Dynamic Virtual Power Plants: An Adaptive Divide-and-Conquer Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 37, n. 5, p. 4040–4053, 2022. DOI: 10.1109/TPWRS.2021.3139775.
- HANSEN, A. D. et al. Models for a stand-alone PV system. In. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55260915>>.
- KHADANGA, R. K.; KUMAR, A.; PANDA, S. A novel modified whale optimization algorithm for load frequency controller design of a two-area power system composing of PV grid and thermal generator. *Neural Comput. Appl.*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, v. 32, n. 12, p. 8205–8216, jun. 2020. ISSN 0941-0643. DOI: 10.1007/s00521-019-04321-7. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00521-019-04321-7>>.
- LASCH, R.; CAMPESTRINI, L.; LIMA, P. R. DE. Projeto e análise de controladores LPV pelo método VRFT. *Sociedade Brasileira de Automática*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.20906/sbai.v1i1.2674>. Disponível em: <[https://www.sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/sbai/article/view/2674](https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbai/article/view/2674)>.
- LESAGE, J. *Commissioning and Validating Renewable Energy Systems using MATLAB and Simulink*. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/videos/commissioning-and-validating-renewable-energy-systems-using-matlab-and-simulink-1651166405798.html>>.
- LI, S.; WU, W.; LIN, Y. Robust Data-Driven and Fully Distributed Volt/VAR Control for Active Distribution Networks With Multiple Virtual Power Plants. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 13, n. 4, p. 2627–2638, 2022. DOI: 10.1109/TSG.2022.3166274.
- MARINESCU, B. et al. Dynamic Virtual Power Plant: A New Concept for Grid Integration of Renewable Energy Sources. *IEEE Access*, v. 10, p. 104980–104995, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3205731.
- MULJADI, E.; SINGH, M.; GEVORGIAN, V. *User Guide for PV Dynamic Model Simulation Written on PSCAD Platform*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/62053.pdf>>.
- NASCIMENTO, R. F. DO. *Usinas Virtuais de Energia: vantagens e viabilidade de aplicação no mercado brasileiro*. 2023. Monografia (MBA em Gestão de Fontes Renováveis de Energia e Eficiência Energética) – Instituto de Pós-Graduação – IPOG, Porto Alegre.
- PESQUISA ENERGÉTICA, E. DE. *Matriz Energética e Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>.
- RAAB, A. F. et al. Virtual Power Plant Control concepts with Electric Vehicles. In: 2011 16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems. [S.l.: s.n.], 2011. P. 1–6. DOI: 10.1109/ISAP.2011.6082214.
- REMES, C. L. *Aplicação de metodologias de controle baseado em dados em conversores CC-CC*. 2021. Doutorado em Engenharia Elétrica – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- ROUZBAHANI, H. M.; KARIMIPOUR, H.; LEI, L. A review on virtual power plant for energy management. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 47, p. 101370, 2021. ISSN 2213-1388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101370>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138821003805>>.
- SABOORI, H.; MOHAMMADI, M.; TAGHE, R. Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types. In: 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. [S.l.: s.n.], 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5749026.
- SIMONE, L. F. C. *Inserção da micro e minigeração distribuída solar fotovoltaica: impactos na receita das distribuidoras e nas tarifas dos consumidores*. 2019. Mestrado em Sistemas de Potência – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/D.3.2019.tde-12082019-074055.
- TOGNETTI, E. S. *Aula: Identificação aplicada à controle de processos*. Brasília, 2021.
- WECC. *About WECC*. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <<https://www.wecc.org/about/about-wecc>>.

# Apêndices

## Apêndice A - PARÂMETROS E CONFIGURAÇÕES DE CONTROLE DAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS

Os parâmetros das plantas fotovoltaicas, considerando a implementação de LeSage (2022), utilizadas nas simulações estão apresentados na Tabela 4. Utilizam-se, também, as configurações de controle: *Q control* (com referência de 0 VAr), *plant-level control*, *coordinated Q/V* desabilitado, *PF control* desabilitado e *P priority*.

**Tabela 4:** *Parâmetros das plantas fotovoltaicas.*

Bloco	Parâmetro	Valor	Bloco	Parâmetro	Valor	Bloco	Parâmetro	Valor
REPC A	Tftr	0,02 s	REEC B	Trv	0,01 s	REGC A	Tftr	0,02 s
	Xc	0 pu		Vdip	0,9 pu		Lvpl1	1 pu
	Re	0 pu		Vup	1,15 pu		Zerox	0,5 pu
	Kc	0,05 pu		dbd1	-0,1 pu		Brkpt	0,9 pu
	db1	0 pu		dbd2	0,1 pu		Lvplsw	0
	emax	999 pu		Kqv	0 pu		rrpwr	10 pu/s
	emin	-999 pu		Iqhl	1 pu		Tg	0,1 s
	Kp	0,6 pu/pu		Iqll	-0,4 pu		Volim	1,1 pu
	Ki	1,8 pu/(pu · s)		Tp	0,02 s		Iolim	-1,2 pu
	Qmax	0,435 pu		Qmax	0,435 pu		Khv	0 pu
	Qmin	-0,435 pu		Qmin	-0,435 pu		Ivpnt0	0,4 pu
	Vfrz	0,7 pu		Kqp	0 pu		Ivpnt1	0,8 pu
	Tft	0,5 s		Kqi	0 pu/(pu · s)		Iqrmax	999,9 pu/s
	Tfv	0,8 s		Vmax	1,1 pu		Iqrmin	-999,9 pu/s
	fdbd1	0 pu		Vmin	0,9 pu			
	fdbd2	0 pu		Kvp	0,1 pu			
	Ddn	20 pu		Kvi	0 pu/(pu · s)			
	Dup	0 pu		Tiq	0,02 pu			
	Tp	0,25 s		Tpord	0,1 s			
	femax	999 pu		Pmax	1 pu			
femin	-999 pu	Pmin	0 pu					
Tlag	0,2 s	dPmax	0,45 pu/s					
Pmax	1 pu	dPmin	-0,45 pu/s					
Pmin	0 pu	Imax	1 pu					

Fonte: LeSage (2022) e Ellis, Behnke e Elliott (2013)

## Apêndice B - EQUIVALENTE DO SISTEMA ELÉTRICO

O sistema elétrico no qual a VPP é conectada pode ser representado por um equivalente de Thévenin, como esquematizado na Figura 28. Utiliza-se no trabalho um sistema em que a tensão nominal é de 13,8 kV, representando um sistema de média tensão. Ao assumir um transformador de corrente (TC) de 400:5 e uma corrente de curto de vinte vezes a nominal do TC tem-se

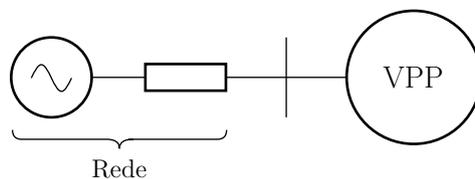
$$I_{cc} = 20 \cdot 400 \text{ A} = 8000 \text{ A}. \quad (100)$$

Logo, a potência de curto circuito como ser definida como

$$P_{cc} = I_{cc} \cdot 13,8 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} \approx 192 \text{ MVA}. \quad (101)$$

Já para a impedância é adotado o valor de 10 para a relação X/R, que é razoável para uma rede de distribuição de média tensão.

**Figura 28:** Equivalente de Thévenin da rede para a conexão com a VPP.



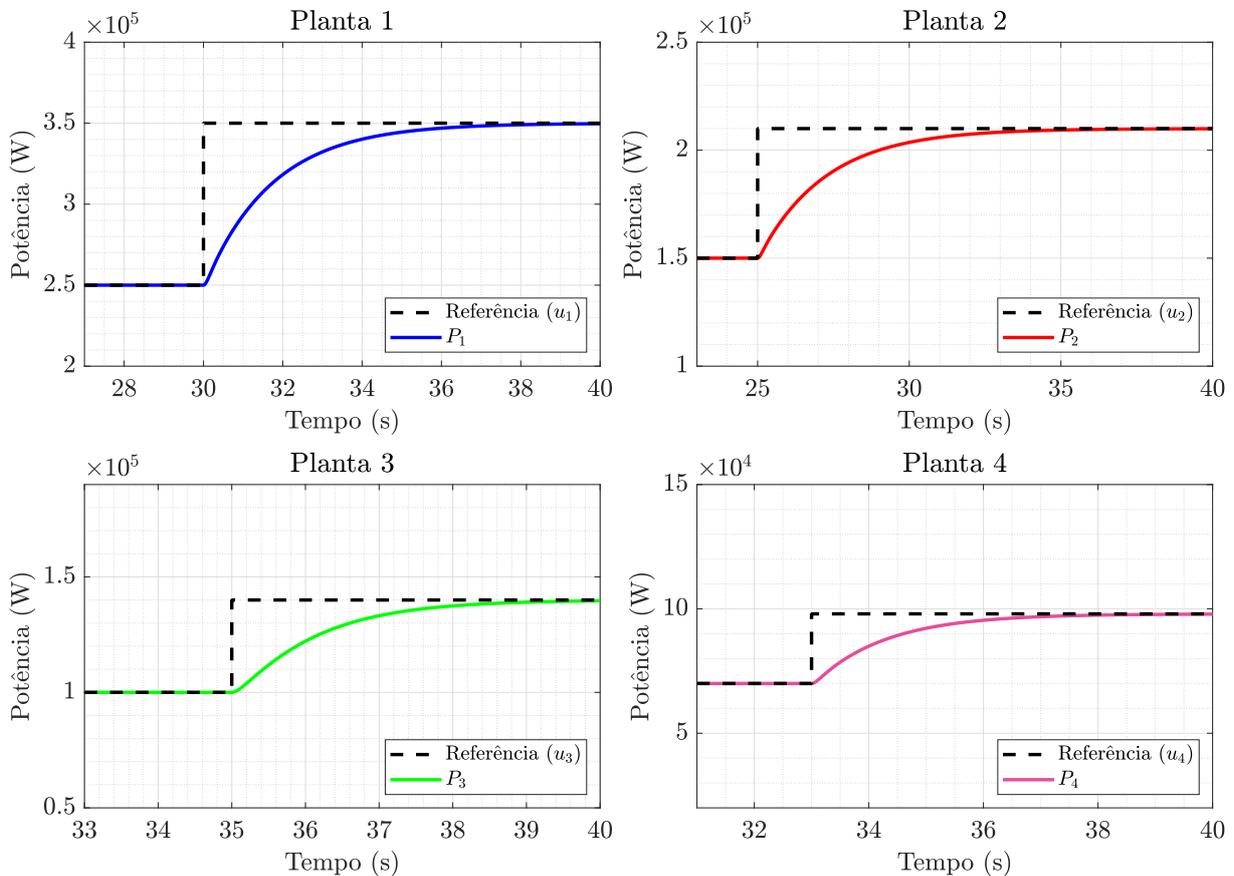
Fonte: do autor

# Apêndice C - ENSAIOS COM AS PLANTAS FOTOVOLTAICAS

## C.1 ENSAIO COM PLANTAS FOTOVOLTAICAS COM CONTROLE INTERNO LINEAR

A Figura 29 apresenta dos dados coletados no ensaio, em malha aberta (sem os controladores da VPP), para as quatro plantas fotovoltaicas utilizadas no presente trabalho. Esses dados consideram o controle interno linear, isto é, sem os filtros de atraso e limitadores de taxa da potência ativa em cada planta.

**Figura 29:** Resultados dos ensaios das quatro plantas, considerando o controle interno linear, para referências de saltos com amplitude de 20% das respectivas potências nominais.

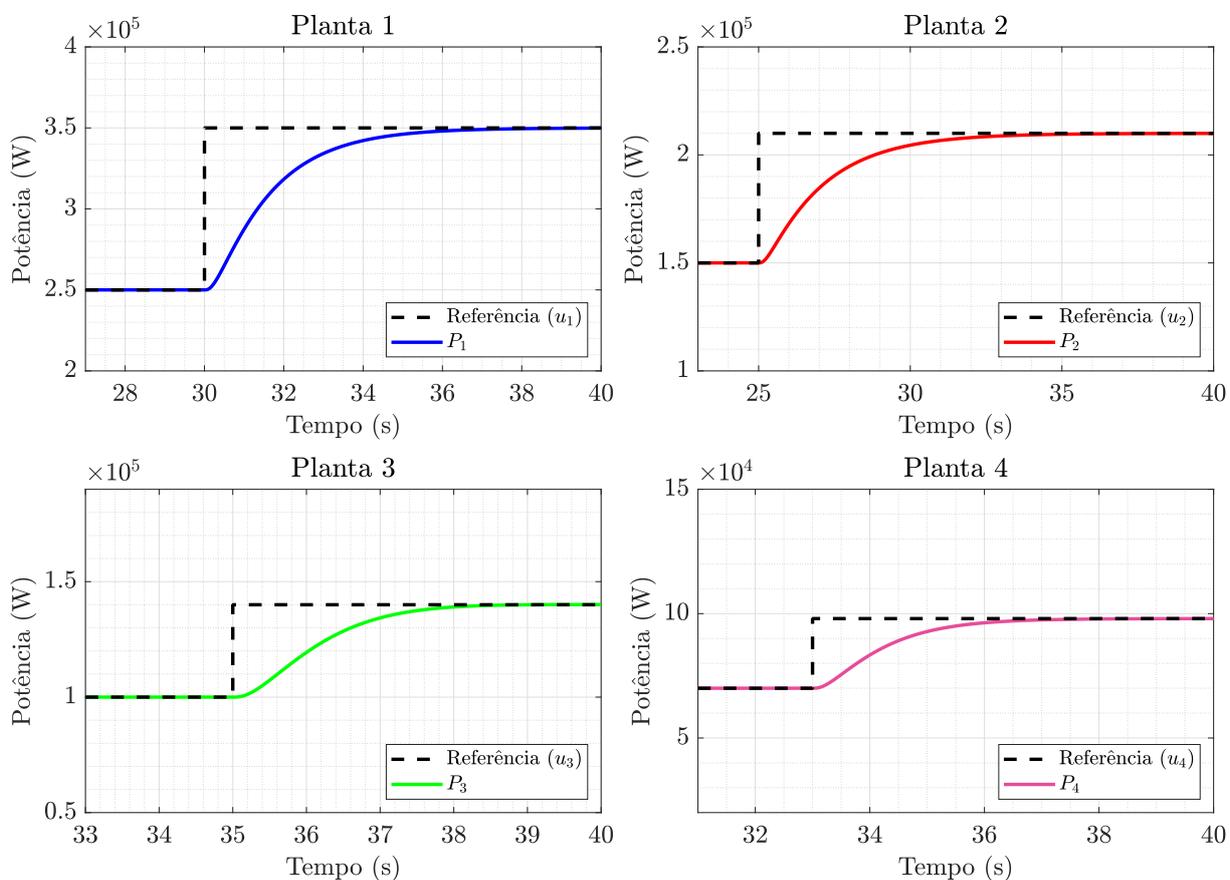


Fonte: do autor

## C.2 ENSAIO COM PLANTAS FOTOVOLTAICAS COM CONTROLE INTERNO NÃO LINEAR

A Figura 30 apresenta dos dados coletados no ensaio, em malha aberta (sem os controladores da VPP), para as quatro plantas fotovoltaicas utilizadas no presente trabalho. Esses dados consideram o controle interno não linear, isto é, com a consideração dos filtros de atraso e limitadores de taxa da potência ativa em cada planta. Nota-se que as respostas são ligeiramente semelhantes aos modelos de segunda ordem (o característico formato “S” é perceptível).

**Figura 30:** Resultados dos ensaios das quatro plantas, considerando o controle interno não linear, para referências de saltos com amplitude de 20% das respectivas potências nominais.



Fonte: do autor