

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JÚLIA CERON BARETTA

**Métodos de Controle baseados em dados para
Conversores CC-CC Duplo Série-Ressonante
com Grampeamento Ativo**

Porto Alegre

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JÚLIA CERON BARETTA

**Métodos de Controle baseados em dados para Conversores
CC-CC Duplo Série-Ressonante com Grampeamento Ativo**

Projeto de Diplomação, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

UFRGS

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores

Porto Alegre

2023

Júlia Ceron Baretta

Métodos de Controle baseados em dados para Conversores CC-CC Duplo Série-Ressonante com Grampeamento Ativo

Projeto de Diplomação, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Renan Caron Viero
PUC-RS

Prof^a. Dra. Thieli Smidt Gabbi
UFRGS

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores
Orientador - UFRGS

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais Alceu e Helena pelo incondicional apoio e amor durante a graduação, pela paciência e por tudo que vocês fazem por mim. Aos meus amigos de Caxias do Sul por sempre estarem do meu lado, mesmo longe. Aos amigos que o curso me trouxe, vocês foram a melhor companhia para esse longa jornada. Ao meu orientador Jeferson pelas melhores aulas do curso, e pelos ensinamentos que foram essenciais para a conclusão deste trabalho. À UFRGS pela educação de alto nível e à CNPq pela Bolsa de Iniciação Científica. Ao Allan Ferreira, pela parceria e compreensão em todos os momentos, obrigada por tudo.

Resumo

Conversores estáticos de potência são elementos capazes de manipular níveis de tensão ou corrente de uma fonte de energia para a alimentação de uma carga. O conversor com característica de comutação suave apresentado é conhecido como Duplo Série-Ressonante com Grampeamento Ativo - DSRAC e pode ser utilizado em uma série de aplicações, por exemplo, projetos de painéis fotovoltaicos e carregadores de baterias elétricas. No entanto, obter um modelo matemático que represente o comportamento do DSRAC é desafiador devido às propriedades não lineares associadas a sistemas chaveados. Sob a ótica de sistemas de controle, conversores geralmente operam em malha fechada com um controlador para melhoria de desempenho. Nesse trabalho o projeto do controlador é feito por métodos de controle baseados em dados, (*data-driven* - DD), o *Virtual Reference Feedback Tuning* (VRFT) e o *Virtual Disturbance Feedback Tuning* (VDFT) aplicados para a topologia do conversor. Tais métodos detêm a vantagem de não utilizar modelos matemáticos para descrever a dinâmica do sistema, apenas dos dados de entrada e saída da planta. Nesse contexto, foram avaliados diferentes aspectos que podem influenciar no controlador resultante como a coleta de dados em malha aberta ou fechada, as possíveis estruturas para o controlador e tipos de modelos de referência. Para a realização de simulações foram empregados os softwares PSIM e MATLAB. Utilizando métodos DD atingiu-se os requisitos de projeto de seguimento de referência com erro nulo e valores de t_s menor do que em malha aberta sem *overshoot*, além da capacidade de rejeitar distúrbios. Comparando os controladores dos dois métodos, conclui-se que o VDFT atingiu uma melhora no desempenho da rejeição de distúrbios e garantia do seguimento da referência. Portanto, assumindo que o ambiente em que o DSRAC é utilizado contém perturbações, o VDFT torna-se a melhor opção para controle do sistema.

Palavras-chave: Conversor Duplo Série-Ressonante com Grampeamento Ativo, Métodos de controle baseados em dados, VRFT, VDFT.

Abstract

Static power converters are elements capable of manipulating voltage or current levels from an energy source to power a load. The converter with soft-switching characteristics presented is known as Dual Series-Resonant Active Clamp Converter - DSRAC and can be used in a range of applications, such as photovoltaic panel projects and electric battery chargers. However, obtaining a mathematical model that represents the behavior of the DSRAC is challenging due to the nonlinear properties associated with switched systems. From the perspective of control systems, converters usually operate in closed loop with a controller to improve performance. In this work, the controller design is done using data-driven control methods (DD methods) such as Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) and Virtual Disturbance Feedback Tuning (VDFT), applied to the converter topology. These methods have the advantage of not using mathematical models to describe the system dynamics, only input and output data from the plant. In this context, different aspects that can influence the resulting controller were evaluated, such as data collection in open or closed loop, possible structures for the controller and types of reference models. The software tools used for the simulations were PSIM and MATLAB. Using DD methods, the reference tracking design requirements were achieved with zero error and smaller t_s values than in open loop without overshoot in addition to the ability to reject disturbances. In conclusion, comparing the controllers from the two methods, the VDFT achieved an improvement in disturbance rejection performance and guaranteed reference tracking. Therefore, assuming that the environment in which the DSRAC is used contains disturbances, VDFT becomes the best option for controlling the system.

Keywords: Dual Series-Resonant Active Clamp Converter, Data-driven methods, VRFT, VDFT.

Lista de Figuras

Figura 1 – Conversor CC-CC linear.	21
Figura 2 – Conversor CC-CC chaveado e funcionamento da chave.	22
Figura 3 – Circuito do DSRAC.	23
Figura 4 – <i>Flyback</i>	24
Figura 5 – Diagrama de blocos em malha fechada.	26
Figura 6 – Experimento de obtenção de dados.	28
Figura 7 – Diagrama de blocos que demonstra o método VDFT.	30
Figura 8 – Ensaio em malha aberta.	34
Figura 9 – Resposta em malha fechada com diferentes controladores na coleta de dados.	40
Figura 10 – Controle projetado a partir de $T_d(z)$ de primeira ordem.	44
Figura 11 – Controle projetado a partir de $T_d(z)$ de segunda ordem.	44
Figura 12 – Resultados de simulação do sistema em malha fechada com controladores projetados por $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.	45
Figura 13 – Resultados de simulação para distúrbios.	46
Figura 14 – Comparação entre o desempenho desejado e obtido para a classe PI.	46
Figura 15 – Resultados de simulação do sistema em malha fechada com controladores projetados por $T_d(z)_{25\%}$ de segunda ordem.	47
Figura 16 – Resultados de simulação para distúrbios.	47
Figura 17 – Comparação entre o desempenho desejado e obtido para a classe PI.	48
Figura 18 – Controle projetado a partir de $T_d(z)$ de primeira ordem.	51
Figura 19 – Controle projetado a partir de $T_d(z)$ de segunda ordem.	51
Figura 20 – Resultados de simulação do sistema em malha fechada com controladores projetados por $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.	52
Figura 21 – Resultados de simulação para distúrbios.	53
Figura 22 – Comparação entre o desempenho desejado e obtido para a classe PI.	53
Figura 23 – Resultados de simulação do sistema em malha fechada com controladores projetados por $T_d(z)_{45\%}$ de segunda ordem.	54
Figura 24 – Resultados de simulação para distúrbios.	54
Figura 25 – Comparação entre o desempenho desejado e obtido para a classe PI.	55
Figura 26 – Resultados de simulação do sistema em malha fechada com controladores PI projetados por VDFT.	59
Figura 27 – Resultados de simulação para distúrbios.	60
Figura 28 – PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ com redução de ganho DC de 40% a partir de dados em malha aberta.	65

Figura 29 – Resultados de simulação para distúrbios com PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ com redução de ganho DC de 40% a partir de dados em malha aberta.	66
Figura 30 – PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ com redução de ganho DC de 30% a partir de dados em malha fechada.	66
Figura 31 – Resultados de simulação para distúrbios 30% PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ com redução de ganho DC de 30% a partir de dados em malha fechada.	67
Figura 32 – Esquemático do Conversor DSRAC - PSIM.	73
Figura 33 – Esquemático dos sinais de entrada/saída do DSRAC - Simulink.	73
Figura 34 – Esquemático do Ambiente de Simulação - Simulink.	73

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do Conversor DSRAC.	33
Tabela 2 – Configurações de modelo de referência.	35
Tabela 3 – Modelos de referência de primeira ordem.	36
Tabela 4 – Modelos de referência de segunda ordem.	37
Tabela 5 – PID gerado por $T_d(z)_{25\%} = \frac{0.007}{(z-0.993)}$	39
Tabela 6 – Análise da atuação do filtro para PID gerado por $T_d(z)$ de primeira ordem.	42
Tabela 7 – Análise da atuação do filtro para PI gerado por $T_d(z)$ de primeira ordem.	42
Tabela 8 – Análise da atuação do filtro para PID gerado por $T_d(z)$ de segunda ordem.	43
Tabela 9 – Análise da atuação do filtro para PI gerado por $T_d(z)$ de segunda ordem.	43
Tabela 10 – Controle projetado a partir de $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.	45
Tabela 11 – Controle projetado a partir de $T_d(z)_{25\%}$ de segunda ordem.	45
Tabela 12 – Análise da atuação do filtro para PID gerado por $T_d(z)$ de primeira ordem.	49
Tabela 13 – Análise da atuação do filtro para PI gerado por $T_d(z)$ de primeira ordem.	49
Tabela 14 – Análise da atuação do filtro para PID gerado por $T_d(z)$ de segunda ordem.	50
Tabela 15 – Análise da atuação do filtro para PI gerado por $T_d(z)$ de segunda ordem.	50
Tabela 16 – Controle projetado a partir de $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.	52
Tabela 17 – Controle projetado a partir de $T_d(z)_{45\%}$ de segunda ordem.	52
Tabela 18 – Controladores PID projetados via VDFFT.	58
Tabela 19 – Controladores PI projetados via VDFFT.	58
Tabela 20 – Controladores PID projetados via VDFFT.	58
Tabela 21 – Controladores PI projetados via VDFFT.	59
Tabela 22 – Resultados de controle baseados na $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.	60
Tabela 23 – Resultados de controle baseados na $T_d(z)_{25\%}$ de segunda ordem.	61
Tabela 24 – Controladores PID projetados via VDFFT.	61
Tabela 25 – Controladores PI projetados via VDFFT.	62
Tabela 26 – Controladores PI projetados via VDFFT.	62
Tabela 27 – Resultados de controle baseados na $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.	62
Tabela 28 – Resultados de controle baseados na $T_d(z)_{45\%}$ de segunda ordem.	63
Tabela 29 – Comparação entre controle PID gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ a partir de dados extraídos em malha aberta.	64
Tabela 30 – Comparação entre controle PID gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ a partir de dados extraídos em malha fechada.	65
Tabela 31 – Comparação entre controle PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ a partir de dados extraídos em malha aberta.	65

Tabela 32 – Comparação entre controle PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ a partir de dados extraídos em malha fechada.	65
Tabela 33 – PID com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MA.	74
Tabela 34 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MA.	74
Tabela 35 – PI com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MA.	75
Tabela 36 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MA.	75
Tabela 37 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MA.	75
Tabela 38 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MA.	76
Tabela 39 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MA.	76
Tabela 40 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MA.	76
Tabela 41 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MA.	77
Tabela 42 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MA.	77
Tabela 43 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MA.	77
Tabela 44 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MA.	78
Tabela 45 – PID com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	78
Tabela 46 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	78
Tabela 47 – PI com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	79
Tabela 48 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	79
Tabela 49 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	79
Tabela 50 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	80
Tabela 51 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	80
Tabela 52 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	80
Tabela 53 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.	81
Tabela 54 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.	81
Tabela 55 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.	81
Tabela 56 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.	82
Tabela 57 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.	82
Tabela 58 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.	82
Tabela 59 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.	83
Tabela 60 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.	83
Tabela 61 – PID com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	83
Tabela 62 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	84
Tabela 63 – PI com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	84
Tabela 64 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	84
Tabela 65 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	85
Tabela 66 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	85
Tabela 67 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	85
Tabela 68 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	86
Tabela 69 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.	86

Tabela 70 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.	86
Tabela 71 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.	87
Tabela 72 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.	87
Tabela 73 – PID com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	87
Tabela 74 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	88
Tabela 75 – PI com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	88
Tabela 76 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.	88
Tabela 77 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	89
Tabela 78 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	89
Tabela 79 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	89
Tabela 80 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.	90
Tabela 81 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.	90
Tabela 82 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.	90
Tabela 83 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.	91
Tabela 84 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.	91
Tabela 85 – PID com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MA.	92
Tabela 86 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MA.	92
Tabela 87 – PID com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MA.	92
Tabela 88 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MA.	93
Tabela 89 – PID com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MA.	93
Tabela 90 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MA.	93
Tabela 91 – PID com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MA.	93
Tabela 92 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MA.	94
Tabela 93 – PI com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MA.	94
Tabela 94 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MA.	94
Tabela 95 – PI com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MA.	94
Tabela 96 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MA.	95
Tabela 97 – PI com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MA.	95
Tabela 98 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MA.	95
Tabela 99 – PI com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MA.	95
Tabela 100 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MA.	96
Tabela 101 – PID com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MA.	96
Tabela 102 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MA.	96
Tabela 103 – PID com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 2 MA.	96
Tabela 104 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 2 MA.	97
Tabela 105 – PID com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 2 MA.	97
Tabela 106 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 2 MA.	97
Tabela 107 – PID com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 2 MA.	97
Tabela 108 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 2 MA.	98

Tabela 109–PI com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MA.	98
Tabela 110–PI sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MA.	98
Tabela 111–PI com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 2 MA.	98
Tabela 112–PI sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 2 MA.	99
Tabela 113–PI com filtro e e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 2 MA.	99
Tabela 114–PI sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 2 MA.	99
Tabela 115–PI com filtro e e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 2 MA.	99
Tabela 116–PI sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 2 MA.	100
Tabela 117–PID com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MF.	100
Tabela 118–PID sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MF.	100
Tabela 119–PID com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MF.	101
Tabela 120–PID sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MF.	101
Tabela 121–PID com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MF.	101
Tabela 122–PID sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MF.	101
Tabela 123–PID com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MF.	102
Tabela 124–PID sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MF.	102
Tabela 125–PI com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MF.	102
Tabela 126–PI sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MF.	102
Tabela 127–PI com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MF.	103
Tabela 128–PI sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MF.	103
Tabela 129–PI com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MF.	103
Tabela 130–PI sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MF.	103
Tabela 131–PI com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MF.	104
Tabela 132–PI sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MF.	104
Tabela 133–PI com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MF.	104
Tabela 134–PI sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MF.	104
Tabela 135–PI com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 2 MF.	105
Tabela 136–PI sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 2 MF.	105
Tabela 137–PI com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 2 MF.	105
Tabela 138–PI sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 2 MF.	105
Tabela 139–PI com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 2 MF.	106
Tabela 140–PI sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 2 MF.	106

Lista de abreviaturas

CA-CC	Conversor Corrente-Alternada-Corrente Contínua
CA-CA	Conversor Corrente-Alternada-Corrente Alternada
CC-CC	Conversor Corrente-Contínua-Corrente Contínua
CC-CA	Conversor Corrente-Contínua-Corrente Alternada
DD	<i>Data Driven</i>
DSRAC	<i>Dual Series-Resonant Active-Clamp Converter</i>
FDT	<i>Frequency Domain Tuning</i>
GR	Grau Relativo
GSSA	<i>Generalized State Space Averaging</i>
IFT	<i>Iterative Feedback Tuning</i>
IV	<i>Instrumental Variables</i>
LIT	Linear Invariante no Tempo
LQG	<i>Linear Quadratic Gaussian</i>
LQR	<i>Linear Quadratic Control</i>
MBC	<i>Model Based Control</i>
MCT	<i>MOS-Controlled Thyristor</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	<i>Power Width Modulation</i>
VRFT	<i>Virtual Reference Feedback Tuning</i>
VDFT	<i>Virtual Disturbance Feedback Tuning</i>
TBJ	Transistor Bipolar de Junção
SISO	<i>Single-input-single-output</i>
ZCS	<i>Zero-Current Switching</i>
ZVS	<i>Zero-Voltage Switching</i>
ZNM	Zero não mínimo

Lista de símbolos

C	Capacitância
C_c	Capacitância de grampeamento ativo
C_o	Capacitância de saída
$C_d(z)$	Controlador ideal em tempo discreto
$C(z, \rho)$	Controlador linearmente parametrizado
$\bar{C}(z)$	Estrutura fixa do controlador
$C_{vrf}(z)$	Controlador projetado por VRFT
\mathcal{C}	Classe do controlador
D	Ciclo de trabalho
$\bar{e}(t)$	Sinal de erro virtual em tempo contínuo, no instante t
f	Frequência em Hz
f_s	Frequência de comutação em Hz
G_{do}	Ganho estático do conversor
$G(z)$	Função de transferência da planta em tempo discreto
$H(z)$	Filtro para ruído branco em tempo discreto
I_L	Corrente da carga
$J_y(\rho)$	Critério de desempenho de seguimento de referência
$J^{VR}(\rho)$	Critério de desempenho do Método da Referência Virtual
$J^{VD}(\rho)$	Critério de desempenho do Método do Distúrbio Virtual
J_{vin}	Critério de desempenho em relação aos distúrbios de entrada
J_{ro}	Critério de desempenho em relação aos distúrbios de saída
$K\%$	Redução percentual do tempo de acomodação
k_p	Ganho proporcional
k_i	Ganho integral
k_d	Ganho derivativa
L	Indutância

L_m	Indutância magnetizante
L_s	Indutância do secundário de um transformador
$L(z)$	Filtro em tempo discreto
n	Relação entre o número de espiras de um transformador
N	Número de amostras em um ensaio
p_c	Polo para atuação de ruído em alta frequência
p_d	Polo dominante de uma função de transferência
$Q(z, \rho)$	Função de sensibilidade aos distúrbios de entrada
$Q_d(z)$	Modelo de referência desejado para o distúrbio de entrada
$r(t)$	Sinal de referência em tempo contínuo, no instante t
$\bar{r}(t)$	Sinal de referência virtual em tempo contínuo, no instante t
R_o	Resistência de saída
R_L	Resistência da carga
S	Chave
$S(z, \rho)$	Função de sensibilidade
T	Período de amostragem
t_{on}	Tempo da chave ligada
t_{off}	Tempo da chave desligada
t_s	Tempo de acomodação
t_{so}	Tempo de acomodação em malha aberta
t_{sc}	Tempo de acomodação em malha fechada
$T(z, \rho)$	Função de sensibilidade complementar
$T_d(z, \rho)$	Função de sensibilidade complementar desejada
$T_d(z)$	Modelo de referência desejado em tempo discreto
$u(t)$	Sinal de entrada da planta em tempo contínuo, no instante t
$v_o(t)$	Sinal de tempo contínuo de tensão de saída, no instante t
V_{in}	Tensão de entrada
V_s	Tensão de saída
V_{CE}	Tensão coletor emissor

$y(t)$	Sinal de saída em tempo contínuo, no instante t
$y_d(t)$	Sinal de saída desejado em tempo contínuo, no instante t
$\omega_s(t)$	Sinal de distúrbio de saída determinístico em tempo contínuo, no instante t
$\omega(t)$	Sinal de perturbação de entrada em tempo contínuo, no instante t
σ^2	Variância
$\varphi(t)$	Vetor regressor em tempo contínuo, no instante t
$\phi_r(e^{j\omega})$	Densidade Espectral de Potência de um sinal discreto $r(k)$
$\phi_u(e^{j\omega})$	Densidade Espectral de Potência de um sinal discreto $u(k)$

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Conversores CC-CC lineares e chaveados	21
2.2	Conversores Ressonantes	22
2.2.1	Conversor Duplo Série-Ressonante com Grampeamento Ativo - DSRAC	23
2.3	Controle baseado em dados	25
2.3.1	Controle por Modelo de Referência	25
2.4	VRFT	28
2.5	VDFT	29
2.6	Aplicação de métodos de controle em conversores de potência CC-CC	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	Ambientes de Simulação	32
3.2	Configuração do experimento	33
3.2.1	Experimento em malha aberta	33
3.2.2	Experimento em malha fechada	34
3.2.3	Escolha de parâmetros do Modelo de Referência	35
3.3	Projeto do controlador VRFT	37
3.4	Projeto do controlador VDFT	37
4	RESULTADOS DO MÉTODO VRFT	39
4.1	Efeito do ganho utilizado na coleta de dados	39
4.2	Sintonia de controladores pelo ensaio em malha aberta	40
4.2.1	Influência do filtro	41
4.2.2	Avaliação de desempenho do seguimento de referência	44
4.3	Sintonia de controladores pelo ensaio em malha fechada	48
4.3.1	Influência do filtro	48
4.3.2	Avaliação de desempenho do seguimento de referência	51
4.4	Considerações finais sobre a aplicação do método VRFT	55
5	RESULTADOS DO MÉTODO VDFT	57
5.1	Considerações Iniciais	57

5.1.1	Comparação entre VRFT e VDFT com levantamento de dados em malha aberta	58
5.1.2	Comparação entre VRFT e VDFT com levantamento de dados malha fechada	61
5.2	Considerações sobre a aplicação do método VDFT	63
5.3	Mudança no modelo de referência para distúrbios	63
6	CONCLUSÕES	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
	APÊNDICE A – CONVERSOR DSRAC	73
	APÊNDICE B – CONTROLE POR VRFT	74
B.1	Dados coletados em malha aberta	74
B.2	Dados coletados em malha fechada	78
	APÊNDICE C – CONTROLE POR VDFT	92
C.1	Dados coletados em malha aberta	92
C.2	Dados coletados em malha fechada	100

1 Introdução

Um dos principais objetivos do campo da Eletrônica de Potência é o processamento de energia elétrica usando dispositivos eletrônicos (W.ERICKSON, 2001). Conversores estáticos de potência são elementos capazes de manipular níveis de tensão ou corrente de uma fonte de energia para a alimentação de uma carga. Os conversores são classificados em diferentes topologias de acordo com a sua capacidade de transformação de energia, tais como conversores CC-CC, CC-CA, CA-CC e CA-CA. Cada uma dessas topologias é utilizada para objetivos específicos nos diversos ramos da engenharia elétrica.

Por exemplo, em (TURKSOY; YILMAZ; TEKE, 2021) um conversor CA-CC do tipo *boost*, com correção do fator de potência, é aplicado em carregadores de bateria para veículos elétricos. O resultado expôs alta densidade de potência com custo e tamanho de baterias reduzidos. Em (PONTES; VIEIRA; JÚNIOR, 2021), um conversor CC-CC com alto ganho e baixa ondulação de corrente na entrada e na saída foi empregado para facilitar o rastreamento do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico (MPPT) em aplicações de sistemas fotovoltaicos ligados a micro e nanoredes. De forma semelhante, em (CASARO; MARTINS, 2010), a mesma topologia operando em frequência e razão cíclica constantes foi capaz de forçar arranjos fotovoltaicos a operar no MPPT.

Para o controle ou o condicionamento de energia elétrica, a conversão de potência é uma necessidade, sendo possibilitada pelas características de chaveamento dos dispositivos de potência (RASHID, 1999). Segundo (MARTINS, 2006), diferentes métodos de chaveamento empregados no controle do fluxo de energia elétrica podem gerar rendimentos diferentes. A comutação de elementos semicondutores, por vezes modulado por largura de pulso (PWM), contribui para a presença de características inerentemente não lineares e perdas de rendimento.

Conforme (W.ERICKSON, 2001), conversores de topologia ressonantes são tidos como conversores de comutação suave (*soft switching*). Estes são capazes de mitigar perdas de comutação através de mecanismos conhecidos como comutação com corrente nula (ZCS, do inglês *zero-current switching*) ou tensão nula (ZVS, do inglês *zero-voltage switching*). As perdas reduzidas viabilizam a operação em frequências de comutação mais altas em comparação com conversores de topologias clássicas como *boost* ou *buck*.

A funcionalidade de conversores geralmente exige que a sua tensão de saída mantenha-se regulada independente de variações de tensão de entrada ou de carga (W.ERICKSON, 2001). Visando esse objetivo de desempenho, usualmente é aplicado o controle em malha fechada. De acordo com (FREEMAN; CHECHIK; TODD, 2020), esse

controle é uma ferramenta essencial para a maioria dos processos de fabricação conhecidos, melhorando a eficiência do sistema e reduzindo sua variação.

Metodologias típicas de sintonia de controladores baseadas em modelos matemáticos, do inglês *model based control* (MBC), incluem alocação de polos e zeros, *Linear Quadratic Control* - LQR, *Linear Quadratic Gaussian* - LQG, resposta em frequência, controle *backstepping*, linearização por realimentação, entre outros (HOU; WANG, 2013). Normalmente, nessas abordagens o primeiro passo é modelar e identificar a planta, e então projetar o controlador com base no modelo encontrado. Segundo (REMES, 2021), o uso de modelos simplificados para conversores, muitas vezes, não são suficientemente representativos devido a aspectos intrínsecos do funcionamento do conversor.

Em (SALATI, 2021) foi apresentado um modelo dinâmico linear em espaço de estados para o conversor Duplo Série-Ressonante com Grampeamento Ativo (DSRAC), proposto por (LEE *et al.*, 2008), através do método do Modelo Médio Generalizado no Espaço de Estados (GSSA) (SANDERS *et al.*, 1990). Destaca-se que o modelo resultante apresenta ordem elevada e complexidade crescente conforme o número de harmônicas consideradas na descrição dos sinais aumenta. Visando a obtenção de um modelo tratável do ponto de vista de controle, foram realizadas técnicas de redução de ordem e avaliação dos efeitos da adição de componentes harmônicas. Finalmente, foram projetados controladores por realimentação de estados. Seus resultados provaram-se eficientes na rejeição de distúrbios de entrada e variações de carga. Contudo, é nítido a dificuldade de modelar tal conversor.

Métodos de controle baseado em dados, *Data Driven* (DD), utilizam um conjunto de dados adquiridos na planta, coletados em malha aberta ou fechada, para projetar um controlador que minimize um dado critério de desempenho. Dessa forma, evita-se o uso da técnica de modelagem. Segundo (OTA; MASUDA; MATSUI, 2019) e (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2011), o método DD conhecido como *Virtual Reference Feedback Tuning* (VRFT) é um método não-iterativo capaz de ajustar diretamente os parâmetros do controlador a partir de um modelo de referência e dos dados experimentais obtidos em um único experimento (*one-shot*). O projeto do controlador é realizado a partir da minimização de uma função de custo quadrática baseada no seguimento de referência (CAMPI; LECCHINI; SAVARESI, 2002). Análogo ao VRFT, o método *Virtual Disturbance Feedback Tuning* (VDFT) (ECKHARD; CAMPESTRINI; BOEIRA, 2018) busca otimizar a resposta em relação a distúrbios do sistema.

Em (REMES, 2021), é feita a aplicação de métodos DD para projetar controladores aplicados a conversores CC-CC de topologia clássicas como *boost* e *sepic*. A tese adaptou a análise as particularidades e objetivos de controle específicos de cada topologia. A presença de um zero de fase não mínima (ZNM) no conversor pode levar o sistema a uma possível instabilidade em malha fechada. Para evitar que isso ocorra, é feito a identificação do ZNM

e a sua adição ao modelo de referência desejado. O procedimento utilizado denominado VRFT flexível, é detalhado em (CAMPESTRINI *et al.*, 2011), e permite a identificação do ZNM, mesmo sem conhecimento do modelo da planta. Em conjunto com o VRFT, foi analisado sua performance em um projeto com malhas de controle em cascata.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Neste contexto, o objetivo geral do trabalho é o estudo acerca das diferentes metodologias de controle baseadas em dados aplicadas no DSRAC. Os parâmetros da resposta do sistema serão examinados para validar a performance dos métodos VRFT e VDFT para o controle do conversor, tanto para seguimento de referência quanto para rejeição de distúrbios.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliação dos efeitos da coleta de dados em malha aberta ou fechada;
- Comparação entre diferentes estruturas de controlador como PI e PID;
- Análise da influência do modelo de referência desejado na resposta;
- Realização de simulações numéricas no software PSIM.

O trabalho está dividido como segue. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica que expõe a topologia de conversores CC-CC e suas especificações, juntamente dos métodos de controle baseado em dados VRFT e VDFT. Já no capítulo 3 expõe-se a metodologia desenvolvida para a sintonia de controladores, os ambientes de simulação, configurações de experimento e de extração de dados. Após, no capítulo 4 e 5 apresentam-se os resultados obtidos a partir das simulações e por último o capítulo 6 exhibe as conclusões encontradas e cenários para futuros trabalhos.

2 Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

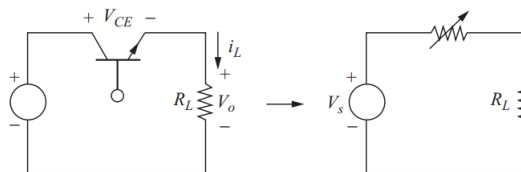
Neste capítulo, é feita uma revisão bibliográfica sobre os conceitos apresentados ao longo do trabalho. Primeiramente, é exibida uma contextualização sobre conversores CC-CC lineares chaveados e ressonantes e a topologia específica do DSRAC. O capítulo também descreve o controle por modelo de referência e o funcionamento dos métodos de controle baseados em dados, em destaque o VRFT e o VDFT, além da sua aplicabilidade no controle de conversores.

2.1 Conversores CC-CC lineares e chaveados

Conversores CC-CC são circuitos eletrônicos de potência que convertem uma tensão CC em um nível médio de tensão CC diferente, geralmente fornecendo uma saída regulada (HART, 2011). Segundo (MARTINS, 2006), o conversor CC-CC é um sistema formado por semicondutores de potência operando como interruptores e por elementos passivos (indutores e capacitores) capazes de controlar o fluxo de energia elétrica da fonte de entrada para a fonte de saída.

A principal discrepância entre o funcionamento de conversores chaveados e lineares, também conhecidos como reguladores, é descrita em (MARTINS, 2006) pelo rendimento característico de cada sistema. No circuito da Figura 1, o conversor linear apresenta tensão de saída como $V_o = I_L R_L$, sendo que a corrente I_L é controlada pelo transistor operando na região linear, cuja potência absorvida $V_{CE} I_L$ impede que o circuito seja altamente eficiente.

Figura 1 – Conversor CC-CC linear.

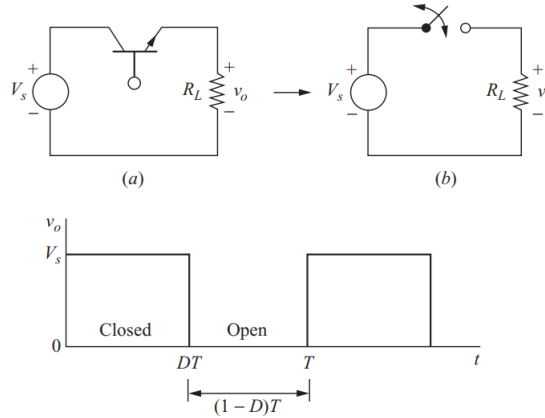


Fonte: (HART, 2011).

Este trabalho aborda a topologia de conversores CC-CC chaveados, cujo funcionamento é apresentado na Figura 2, onde o transistor opera como um interruptor eletrônico de dois estados - *on/off* (saturação ou corte para um TBJ ou triodo e corte para um MOSFET) (HART, 2011). Supondo que a chave tem comportamento ideal, a saída do

circuito pode assumir dois valores: igual a entrada, com a chave fechada, ou zero, com a chave aberta, no entanto, em circuitos reais podem ocorrer perdas de chaveamento.

Figura 2 – Conversor CC-CC chaveado e funcionamento da chave.



Fonte: (HART, 2011).

Destaca-se que o mecanismo de controle para o chaveamento de um conversor geralmente é obtido através de uma modulação por largura de pulso (PWM). A regulação do sinal de controle é obtida alterando a relação entre t_{on} e t_{off} em um ciclo de chaveamento completo T .

A componente CC da tensão de saída é controlada pelo ciclo de trabalho (D), que é uma fração do período de comutação em que a chave está fechada, definido por:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on}f \quad (1)$$

quando a frequência de comutação f , em Hz, é suficientemente alta.

O chaveamento resulta em uma tensão de saída média de:

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = V_s D. \quad (2)$$

Segundo (HART, 2011) grande parte das perdas de rendimento de conversores tem origem nas imperfeições de chaveamento. Os dispositivos de chaveamento absorvem energia quando são ligados ou desligados se a transição de estado for feita quando tensão e corrente não são nulas. À medida que a frequência de chaveamento aumenta, essas transições ocorrem com mais frequência e a perda média de energia no dispositivo aumenta. Ainda assim, altas frequências de chaveamento são desejáveis pois promovem uma diminuição nos componentes de filtro e transformadores, o que reduz o tamanho e o peso do conversor.

2.2 Conversores Ressonantes

Uma das maneiras de reduzir tais perdas é a alteração do circuito para que a comutação ocorra em tensão e/ou corrente nula diminuindo as perdas na transição de

estado das chaves. O mecanismo ressonante que permite essa característica dá o nome a essa família de conversores, que segundo (LIU; ORUGANTI; LEE, 1987) é extensivamente utilizada pelas vantagens oferecidas na redução de perdas e minimização de interferência eletromagnética.

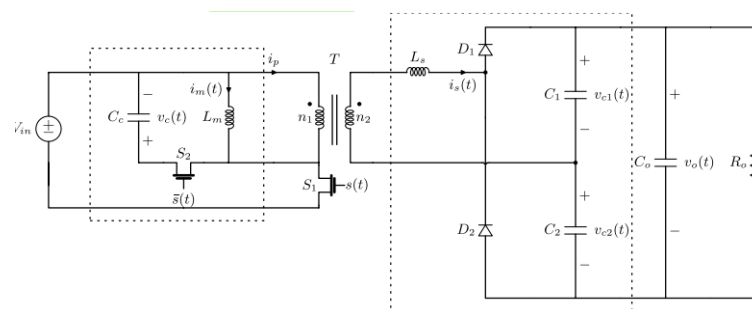
Em (LIU; ORUGANTI; LEE, 1987), demonstra-se que a técnica de chaveamento ressonante aplicada em conversores convencionais possibilitou operações em altas frequências. Sendo assim, a adição de um sub-circuito ressonante, também conhecido como tanque ressonante, depende das exigências de funcionalidade do conversor. O tanque contribui com a capacidade de modular o valor de ganho alterando a frequência de comutação (YU; VISWANATHAN, 2018). Normalmente formado por um dispositivo semiconductor, indutor e capacitor. O *soft switching* funciona colocando a frequência de chaveamento próximo da frequência natural do tanque ressonante, permitindo o controle de variáveis desejadas como corrente e tensão.

2.2.1 Conversor Duplo Série-Ressonante com Grampeamento Ativo - DSRAC

(LEE *et al.*, 2008) expõe que conversores ressonantes detêm algumas desvantagens como a dificuldade no projeto de filtros devido a ampla variação da frequência de chaveamento. Desse modo, a solução proposta no mesmo trabalho foi agregar características de conversores modulados por PWM com as técnicas de *soft switching*. Essa nova família de conversores pode ser vista como um híbrido entre conversores modulados por PWM e conversores ressonantes (LIU; ORUGANTI; LEE, 1987). O circuito do conversor Duplo Série-Ressonante com Grampeamento Ativo (*Dual Series-Resonant Active-Clamp Converter*) DSRAC é apresentado na Figura 3, conforme considerado em (SALATI, 2021).

O conversor é constituído por um transformador ideal (T), cujo lado primário aparenta a topologia de um *flyback* com grampeamento ativo. O lado secundário é composto por um tanque ressonante formado por uma indutância L_s e dois capacitores C_1 e C_2 , um retificador dobrador de tensão ligado a um capacitor de filtro C_o em conjunto com a carga representada pela resistência R_o .

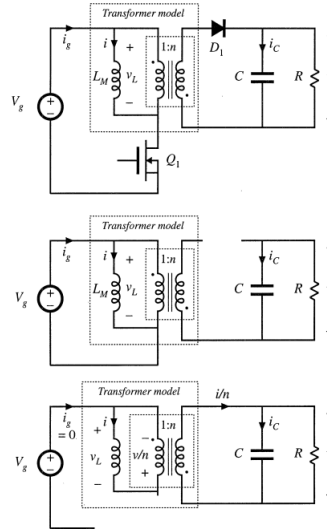
Figura 3 – Circuito do DSRAC.



Fonte: (SALATI, 2021).

Um conversor *flyback* é baseado no conversor *buck-boost*, substituindo o indutor L por um transformador. Quando a chave Q_1 conduz, a energia da fonte é armazenada em L_m , e quando o diodo D_1 conduz, a energia é transferida para a carga, com tensão e corrente respeitando a razão entre as espiras (W.ERICKSON, 2001). A corrente percorre ambas as bobinas, mas nunca ao mesmo tempo, conforme funcionamento visto na Figura 4.

Figura 4 – *Flyback*.



Fonte: (W.ERICKSON, 2001).

Em (W.ERICKSON, 2001) é expresso que a energia armazenada por L_s e L_m causa picos de tensão na chave. Por esse motivo, o uso do grampeamento ativo (do inglês, *active clamp*) é adicionado no lado primário do circuito do DSRAC. A energia dos indutores é repassada ao capacitor de grampeamento C_c quando a chave S_1 está ligada. Depois, no próximo ciclo de chaveamento, a energia é transmitida para o lado secundário. Dessa forma limita-se o estresse de chaveamento em S_1 , com perdas mínimas, habilitando a comutação em tensão nula (ZVS).

As chaves S_1 e S_2 operam de forma complementar controladas por PWM, enquanto que o ciclo de trabalho D é referente ao funcionamento da chave S_1 . As chaves dispõem de resistência de condução R_{on} com a finalidade de simular um comportamento similar ao seu comportamento real.

A partir das especificações, considerando $L_m \gg L_s$, o ganho estático (G_{d0}) do conversor é:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{n}{1 - D}, \quad 0 \leq D < 1 \quad (3)$$

onde n representa a relação do número de espiras. Dessa forma, se $n > 1 - D$, o conversor funciona como um elevador de tensão. Caso contrário, é um abaixador de tensão.

2.3 Controle baseado em dados

Em métodos de controle baseado em dados, do inglês, *Data Driven* (DD), para a otimização de um critério de referência utiliza-se somente dados de entrada e saída do ensaio da planta. A principal vantagem dessa abordagem é que ela não depende de um modelo matemático, ao contrário dos métodos baseados em modelos que, de acordo com (ZHENG; ZHANG, 2020), fornecem apenas uma aproximação do sistema real. Isso ocorre porque a presença de dinâmicas que não podem ser modeladas podem tornar os sistemas projetados pelo controle baseado em modelos menos robustos do que o desejado.

A sintonia de controladores pela abordagem DD não utiliza informações sobre a função de transferência da planta $G(z)$. Nesse caso, formula-se um novo problema de otimização baseado no dados coletados da planta, e dessa forma identifica-se um controlador cuja resposta do sistema em malha fechada é a mais parecida com a resposta ideal definida por um dado modelo de referência.

A literatura de controle DD inclui diferentes perspectivas para o projeto de controladores sem o modelo da planta. O método *Iterative Feedback Tuning* (IFT) originado por (HJALMARSSON *et al.*, 1998), foi aplicado em (ABEDINI; ZARABADIPOUR, 2011), e mostrou-se efetivo na sintonia de um PID para o controle de velocidade de um motor DC. Em (KAMMER; BITMEAD; BARTLETT, 1998) é proposto o *Frequency Domain Tuning* (FDT) no qual o ajuste de controle é obtido diretamente das propriedades no domínio frequência do sistema em malha fechada.

A premissa em comum entre os métodos citados é a iteratividade no procedimento de sintonia do controlador. Um dos métodos que difere dessa abordagem é o *Virtual Reference Feedback Tuning* - VRFT proposto originalmente por (CAMPI; LECCHINI; SAVARESI, 2002). Variações dessa metodologia são encontradas na literatura, tal como o *Virtual Disturbance Feedback Tuning* - VDFT visto em (ECKHARD; CAMPESTRINI; BOEIRA, 2018), que apresenta ênfase em aplicações industriais uma vez que a rejeição de distúrbios, nesse ambiente, é mais comum do que a necessidade de seguimento de referência.

2.3.1 Controle por Modelo de Referência

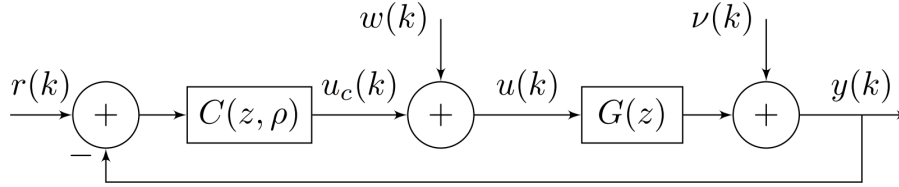
Suponha uma planta em tempo discreto *single-input single-output* - SISO, linear e invariante no tempo (LIT) descrita por $G(z)$. A saída desse sistema é dada por $y(t) = G(z)u(t) + v(t)$; onde $v(t) = H(z)\epsilon(t) + \omega_s(t)$ é um distúrbio de saída composto por um ruído branco $\epsilon(t)$ com variância σ^2 e filtrado por $H(z)$ em conjunto com um sinal de distúrbio de saída determinístico $\omega_s(t)$. Considere também que em malha fechada $u(t) = u_c(t) + \omega(t)$ onde $u_c(t)$ é a saída do controlador e $\omega(t)$ é um distúrbio de entrada. O sinal de controle $u_c(t)$ é resultante de um controlador linearmente parametrizado definido

como $C(z, \rho)$, tal que $u_c(t) = C(z, \rho)(r(t) - y(t))$ onde $r(t)$ é o sinal de referência a ser seguido por $y(t)$. A partir dessas definições, segue que a saída do sistema operando em malha fechada será dada por:

$$\begin{aligned} y(t, \rho) &= T(z, \rho)r(t) + S(z, \rho)v(t) + Q(z, \rho)w(t) \\ S(z, \rho) &= \frac{1}{1+C(z, \rho)G(z)} \\ T(z, \rho) &= \frac{C(z, \rho)G(z)}{1+C(z, \rho)G(z)} = C(z, \rho)G(z)S(z, \rho) \\ Q(z, \rho) &= \frac{G(z)}{1+C(z, \rho)G(z)} = \frac{T(z, \rho)}{C(z, \rho)} = S(z, \rho)G(z). \end{aligned} \quad (4)$$

onde $S(z, \rho)$ é chamada de função sensibilidade e $Q(z, \rho)$ é a função de sensibilidade a distúrbios de entrada. Ainda, $T(z, \rho)$ é conhecida como função de sensibilidade complementar, descrita pela relação $T(z, \rho) = 1 - S(z, \rho)$.

Figura 5 – Diagrama de blocos em malha fechada.



Fonte: (REMES, 2021).

O conjunto de todos os controladores que podem ser adicionados a malha de controle através de uma estrutura fixa, representada por $\bar{C}(z)$, é conhecido como uma classe de controlador $\mathcal{C} = \{C(z, \rho) : \rho \in P\}$, em $P \subseteq R^p$ está contido os possíveis valores para o parâmetro ρ .

Uma das estruturas de controle mais utilizadas é o controlador PID (proporcional-integral-derivativo), representado em tempo discreto como

$$C(z, k_p, k_i, k_d) = k_p + k_i \frac{z}{z-1} + k_d \frac{z-1}{z-p_c}. \quad (5)$$

De acordo com (OGATA, 2011), a ação integral do PID elimina erros residuais de um sinal de controle, no entanto, também pode causar respostas oscilatórias de amplitudes variadas, em geral indesejáveis ao sistema. Por outro lado, a adição de uma ação derivativa, ainda segundo (OGATA, 2011), dá ao controlador a habilidade de corrigir o valor do erro de seguimento, antes que ele se torne elevado, conhecida como ação preditiva.

Uma das variações do PID é o controlador do tipo PI, representado pela mesma estrutura (5), porém sem ação derivativa ($k_d = 0$). Neste trabalho será desconsiderado o projeto do polo p_c , que serve para atenuar ganhos de ruídos em altas frequências ou seja, será assumido $p_c = 0$.

Dado que esse controlador pode ser linearmente parametrizado na forma $C(z, \rho) = \rho^T \bar{C}(z)$, sendo ρ um vetor formado pelas constantes (proporcional, integral e derivativa) e $\bar{C}(z)$ um vetor de funções de transferências independente, ambos definidos por

$$\rho = \begin{bmatrix} k_p \\ k_i \\ k_d \end{bmatrix} \quad \bar{C}(z) = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{z}{z-1} \\ \frac{z-1}{z} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

O controle realizado pelo Modelo de Referência trata da resposta do sistema em malha fechada e sua relação com o sinal de referência, desconsiderando efeitos de ruído. Para alcançar o comportamento desejado, formula-se a função custo (7), intitulado como critério de seguimento de referência

$$J_y(\rho) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N [y(t) - y_d(t)]^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N [(T(z, \rho) - T_d(z))r(t)]^2. \quad (7)$$

Uma vez que $T_d(z)$ é o modelo de referência desejado, cujo comportamento deve refletir a atuação esperada em malha fechada. A partir dessas definições, torna-se evidente que o valor mínimo de $J_y(\rho)$ decorre do valor de ρ que aproxima a saída $y(t)$ a saída desejada $y_d(t) = T_d(z)r(t)$.

Por definição, o chamado controlador ideal é aquele que, quando aplicado na malha de controle, faz com que $J_y(\rho)$ alcance zero, garantindo o comportamento do sistema como especificado pela $T_d(z)$. Baseado em (4), o controlador desejado será dado por

$$C_d(z) = \frac{T_d(z)}{G(z)(1 - T_d(z))}. \quad (8)$$

Caso seja possível atingir $C_d(z)$ com a estrutura de controlador escolhida, então o controlador ideal pertence à classe \mathcal{C} e existe um vetor de parâmetros ρ_d tal que $C(z, \rho_d) = C_d(z)$. Caso contrário, existe um vetor de parâmetros ρ^* tal que $C(z, \rho^*)$ é o controlador sintonizado que resulta no menor $J_y(\rho)$ possível.

A causalidade do controlador ideal é dependente da diferença entre o grau relativo da planta e do modelo de referência, conforme (8). Portanto, para garantir um controlador causal, o grau relativo (GR) $\{numT_d(z) - denT_d(z)\}$ da $T_d(z)$ deve ser igual ou maior ao GR do processo.

A dinâmica da $T_d(z)$ deve atribuir o comportamento desejado do sistema em malha fechada, no entanto, é preciso atentar-se a possível existência de ZNM no processo que manifestam-se como polos instáveis de $C_d(z)$. Para afastar esse feito indesejado, os ZNM devem ser adicionados ao numerador do modelo de referência (BAZANELLA;

CAMPESTRINI; ECKHARD, 2011). Por fim, para que o seguimento de referência seja atingido com erro nulo, a restrição $|T_d(1)| = 1$ deve ser respeitada.

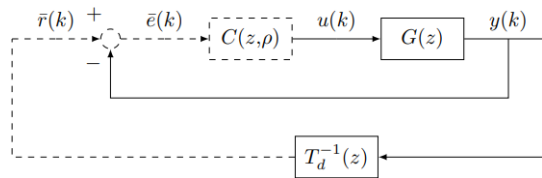
2.4 VRFT

O VRFT é um dos métodos de controle baseado em dados conhecido pelo uso de um único experimento que coleta o conjunto de dados em malha aberta ou fechada para a otimização de um critério de desempenho. A vantagem desse método está na otimização de um critério de seguimento de referência do tipo quadrático, conhecido como $J^{VR}(\rho)$, cujo mínimo global, em condições ideais, equivale ao mínimo de $J_y(\rho)$. Além disso, o problema de otimização pode ser resolvido através do método dos mínimos quadrados que simplifica a implementação do VRFT.

O projeto de $C(z, \rho)$ ocorre através de um experimento em malha aberta ou fechada, onde o sinal de controle que entra na planta $u(t)$ e a saída $y(t)$ são armazenados, constituindo um conjunto $[u(t), y(t)]_{t=1}^N$, sendo N o número de amostras coletadas. A partir dos dados de saída e da $T_d(z)$, é gerado o sinal de referência virtual $\bar{r}(t) = T_d(z)^{-1}y(t)$ e de erro virtual $\bar{e}(t) = \bar{r}(t) - y(t)$. Esses sinais são demonstrados na Figura 6, onde as linhas sólidas representam os sinais medidos e as linhas tracejadas os sinais virtuais gerados a partir da coleta de dados. Assim, o VRFT consiste em determinar um valor ótimo de ρ tal que o controlador $C(z, \rho)$, quando alimentado por $\bar{e}(t)$, resulte no sinal de controle mais próximo possível do sinal $u(t)$ coletado no ensaio. Esse objetivo é representado por uma função custo definida por

$$J^{VR}(\rho) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N [u(t) - C(z, \rho)\bar{e}(t)]^2 \quad (9)$$

Figura 6 – Experimento de obtenção de dados.



Fonte: (REMES, 2021).

Definindo agora o vetor regressor $\varphi(t)$ como

$$\varphi(t) = \bar{C}(z)\bar{e}(t) = \bar{C}(z)\frac{1 - T_d(z)}{T_d(z)}y(t). \quad (10)$$

Então segue que, a estimativa de ρ que minimiza a função (9) é calculada pelo método dos mínimos quadrados

$$\hat{\rho} = \left[\sum_{t=1}^N \varphi(t) \varphi^T(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^N \varphi(t) u(t). \quad (11)$$

No entanto, somente em situações sem ruído e que o controlador ideal pertence à classe considerada, $C_d(z) \in \mathcal{C}$, que $\hat{\rho} = \rho_d$, ou seja, $J_y(\rho)$ e $J^{VR}(\rho)$ possuem o mesmo valor mínimo.

Caso o controlador ideal não pertença à classe de controladores pré-determinada, então $\hat{\rho} \neq \rho_d$. A literatura sugere o uso de um filtro $L(z)$ nos dados visando aproximar os mínimos de $J_y(\rho)$ e $J^{VR}(\rho)$. Uma boa aproximação do filtro $L(z)$, para que $J_y(\rho) = J^{VR}(\rho)$ é apresentada em (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2011) tal que:

$$\left| L(e^{j\omega}) \right|^2 = \left| T_d(e^{j\omega}) \right|^2 \left| S(e^{j\omega}, \rho) \right|^2 \frac{\phi_r(e^{j\omega})}{\phi_u(e^{j\omega})}, \forall \omega \in [\pi; -\pi], \quad (12)$$

onde $\phi_r(e^{j\omega})$ é chamado de densidade espectral de potência do sinal de referência $r(t)$ enquanto que $\phi_u(e^{j\omega})$ é a densidade espectral de potência do sinal $u(t)$, coletado no experimento.

Supondo que $S(z, \rho)$ pode ser aproximada por $1 - T_d(z)$ e que os espectros de $r(t)$ e $u(t)$ são similares tais que $\frac{\phi_r(e^{j\omega})}{\phi_u(e^{j\omega})} \approx 1$ segue que o filtro $L(z)$ pode ser aproximado por

$$L(z) = T_d(z)(1 - T_d(z)). \quad (13)$$

Nesse caso, a estimativa de ρ é definida em (14), onde $\varphi_L(t) = L(z)\varphi(t)$ e $u_L(t) = L(z)u(t)$.

$$\hat{\rho} = \left[\sum_{t=1}^N \varphi_L(t) \varphi_L^T(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^N \varphi_L(t) u_L(t) \quad (14)$$

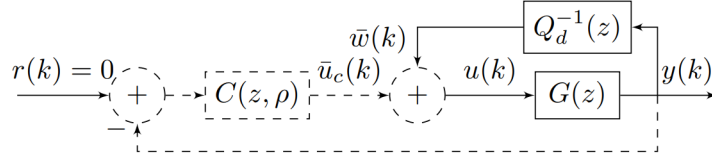
Em circunstâncias que a presença do ruído não pode ser ignorada, a estimativa de ρ torna-se polarizada. Uma das possíveis soluções para esse problema é a utilização de variáveis instrumentais, (em inglês *Instrumental Variables-IV*), técnica proposta em (CAMPI; LECCHINI; SAVARESI, 2002).

2.5 VDFT

O método de controle baseado em dados conhecido como VDFT tem procedimento análogo ao VRFT, no qual defini-se uma estrutura fixa para o controlador, um modelo de referência para distúrbios e uma dinâmica desejada para a resposta definida agora por $Q_d(z)$. Em conjunto com os dados coletados no experimento, encontra-se um controlador capaz de otimizar a função $J^{VD}(\rho)$, análoga à $J^{VR}(\rho)$, porém relacionada à resposta a distúrbios de entrada do sistema em malha fechada.

Apresenta-se na Figura 7, o sinal de distúrbio virtual $\bar{w}(t) = Q_d^{-1}(z)y(t)$ e o sinal de controle virtual $\bar{u}_c(t)$, de modo que $u(t) = \bar{u}_c(t) + \bar{w}(t)$. Além disso, considera-se que a referência $r(t)$ é nula, assim o erro virtual $\bar{e}(t) = -y(t)$.

Figura 7 – Diagrama de blocos que demonstra o método VDFT.



Fonte: (REMES, 2021).

Logo, a função custo quadrática (15) é minimizada pela formulação dos mínimos quadrados já vista em (14).

$$J^{VD}(\rho) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N \{L(z)[\bar{u}_c(t) - C(z, \rho)\bar{e}(t)]\}^2 \quad (15)$$

No entanto, aqui o filtro $L(z)$ é aproximado por

$$|L(e^{j\omega})|^2 = |Q_d(e^{j\omega})Q(e^{j\omega}, \rho)|^2 \frac{\phi_d(e^{j\omega})}{\phi_y(e^{j\omega})}, \forall \omega \in [\pi; -\pi], \quad (16)$$

Nesse caso, $\phi_d(e^{j\omega})$ é chamado de densidade espectral de potência do sinal de distúrbio, enquanto que $\phi_y(e^{j\omega})$ é a densidade espectral de potência do sinal de saída coletado no experimento. A aproximação utilizada $L(e^{j\omega}) = Q_d(e^{j\omega})$ é a mesma de (ECKHARD; CAMPESTRINI; BOEIRA, 2018), visto que o filtro $L(z)$ é dependente do modelo $G(e^{j\omega})$, que está indisponível no contexto de controle baseado em dados.

A definição de um modelo de referência para distúrbios $Q_d(z)$ deve ser desenvolvida visando a resposta em malha fechada do sistema em relação aos sinais de perturbação $\bar{w}(t)$. Nesse sentido, a $Q_d(z)$ ideal deve rejeitar distúrbios, tal que $y_d(t) = Q_d(z)\bar{w}(t)$.

O método VDFT também pode ser aplicado com variáveis instrumentais, tal como o VRFT.

2.6 Aplicação de métodos de controle em conversores de potência CC-CC

Em (REMES, 2021) é proposto a aplicação dos métodos VRFT e VDFT para o projeto de controladores utilizados em conversores CC-CC tipo *buck*, *boost*, *buck-boost* e seus derivados. Nesta seção expõem-se as etapas do projeto e suas principais contribuições aplicadas neste trabalho. Considerando que conversores do tipo *boost* e *buck-boost* apresentam um ZNM, fez-se uso do algoritmo do VRFT flexível.

O experimento de coleta de dados da planta é realizado ao redor do ponto de operação do conversor. Então aplica-se no sistema um sinal de entrada suficientemente excitante para que os dados da planta disponha de informações corretas para a identificação dos parâmetros do controlador ideal. O levantamento de dados é feito em malha fechada com o uso de um controlador proporcional inicial baseado no ganho estático G_{d0} do conversor.

O método utilizado exige a escolha de uma estrutura fixa de controle e de um modelo de referência para o controle da tensão de saída. A fim de garantir o seguimento de referências e rejeição de distúrbios definiu-se a classe PID. Para o modelo de referência, em casos de planta com ZNM, o mesmo deve ser adicionado a $T_d(z)$. Por último, o tempo de acomodação que se deseja é definido pelo polo dominante de $T_d(z)$.

Um conversor tipo *boost* obteve um controle que atendia os requisitos de erro nulo em regime permanente para referência/distúrbio do tipo degrau, tempo de acomodação 20% mais rápido que em malha aberta e *overshoot* nulo. O resultado foi alcançado em 11 iterações a partir de um $T_d(z)$ de segunda ordem e grau relativo igual a 1.

O controle proposto pelo VDFT foi realizado com o objetivo de melhorar o desempenho na rejeição de perturbações. A escolha da classe PID também foi utilizada no VDFT, no entanto o polo derivativo foi definido visando melhorias na robustez do projeto. A definição do modelo de referência para distúrbios $Q_d(z)$ provou-se mais trabalhosa do que a escolha da $T_d(z)$. O controle resultante atendeu o requisito de projeto com tempo de acomodação 10% menor que o de malha aberta.

Os resultados obtidos demonstram que o desempenho do controle protegido por VDFT apresenta menores picos de tensão diante de distúrbios e, ao mesmo tempo, diminuição do tempo de acomodação em relação à referência, apesar de apresentar um sinal de controle mais agressivo.

3 Metodologia

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia empregada na aquisição de dados do ensaio, a definição dos modelos $T_d(z)$ e $Q_d(z)$ e as configurações necessárias para a realização do experimento em malha aberta e malha fechada. As etapas são descritas para alcançar o controle adequado para o conversor DSRAC através dos métodos de controle VRFT e VDFT.

A resposta em malha fechada será considerada satisfatória baseando-se nas métricas de *overshoot* e tempo de acomodação (t_s). Deseja-se, assim, que a dinâmica final tenha *overshoot* nulo e t_s menor do que em malha aberta em relação a sinais de referência tipo degrau. Além disso, que seja capaz de minimizar os efeitos de sinais de distúrbios.

As etapas que constituem um projeto de controlador por VRFT são apontadas como:

- Realização do ensaio de coleta de dados de entrada e saída $[u(t), y(t)]_{t=1}^N$ em malha aberta ou fechada;
- Determinação da classe de controladores \mathcal{C} para a estrutura de controle $\bar{C}(z)$, do modelo de referência $T_d(z)$ e uso, ou não, do filtro $L(z)$;
- Aplicação do algoritmo do VRFT para obter o ρ que minimiza $J^{VR}(\rho)$.

Um processo análogo ao descrito a cima é feito para o método do VDFT.

3.1 Ambientes de Simulação

As simulações foram realizadas nos softwares MATLAB/Simulink®, em conjunto com o PSIM®. Essas ferramentas foram definidas respectivamente pela facilidade de programação e uso extensivo na área de eletrônica de potência. A integração entre o circuito de potência feito no PSIM, e o ambiente em que ele é simulado no Simulink é realizada através do bloco SimCoupler do Matlab. A partir da co-simulação, os sinais de controle enviados pelo Simulink ao PSIM, são transformados em sinais de potência e vice-versa. Os softwares utilizados também admitem a inclusão de não idealidades nas simulações como a resistência interna de componentes e a adição de ruído nos sinais, buscando a aproximação do comportamento do sistema na vida real. Após o levantamento dos dados do ensaio (em malha aberta e fechada), a rotina dos algoritmos foi programada no Matlab, baseados em (BAZANELLA; CAMPESTRINI; ECKHARD, 2011) e (REMES, 2021).

O modelo do conversor DSRAC usado neste trabalho teve seus parâmetros projetados na referência (VASCONCELLOS, 2019), tornando-se base para a identificação/mode-

lagem apresentada em (SALATI, 2021) com seus valores apresentados na Tabela 1. Nas Figuras 32, 33 e 34, localizadas no Apêndice A, são apresentados o circuito de potência do conversor DSRAC, o diagrama de blocos que implementa a cossimulação e a rotina de controle, respectivamente.

Tabela 1 – Parâmetros do Conversor DSRAC.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
V_{in}	15.5V	n	4
L_m	15 μ H	R_{on}	250m Ω
C_c	150 μ F	L_s	1 μ H
C_r	1 μ F	C_o	150 μ F
R_o	250 Ω	D	0.3
f_s	50kHz		

Fonte: (SALATI, 2021).

3.2 Configuração do experimento

O experimento de coleta de dados de entrada e saída do conversor DSRAC pode ser realizado em malha aberta ou em malha fechada com o sistema operando com um controlador proporcional pré-estabelecido, como realizado em (REMES, 2021).

Deve-se mencionar que nas simulações deste trabalho arbitrou-se que o sinal de controle $u(t)$ é dado como saturado - quando ultrapassar os limites da faixa $0.2 < u(t) < 0.8$. A presença de *overshoot* somente é reconhecida quando o valor ultrapassar a faixa de definição do regime permanente de 2%. Por último, define-se o tempo de acomodação do sistema no instante em que o sinal de saída atinge 98% do valor em regime permanente $y_{(98)}$.

$$y_{(98)} = y_{(0)} + 0.98(y_{(\infty)} - y_{(0)}) \quad (17)$$

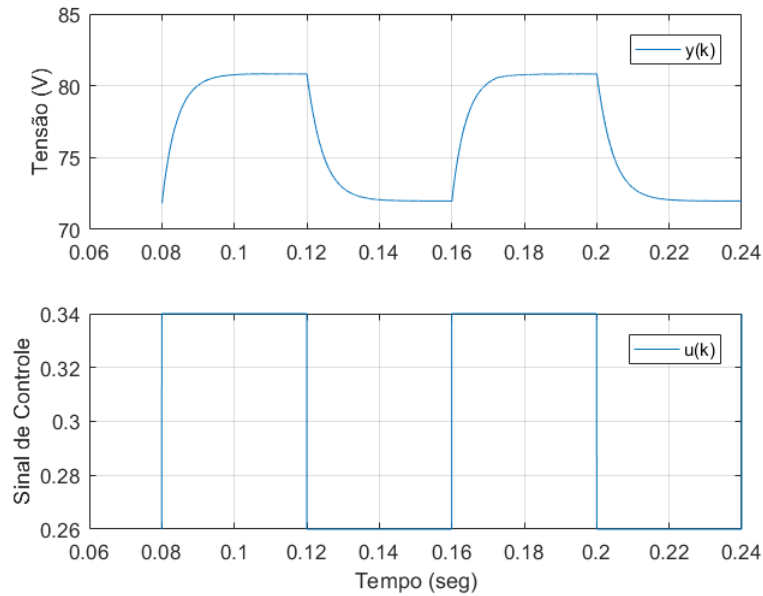
Em todos os ensaios, o tempo de simulação utilizado foi de 0.24 segundos, mais do que suficiente para observar o comportamento do sistema, exigindo menor tempo de processamento para rodar as simulações.

3.2.1 Experimento em malha aberta

A coleta de dados realizada em malha aberta é iniciada fixando o funcionamento do conversor no ponto de operação, determinado no trabalho de (VASCONCELLOS, 2019) por um ciclo de trabalho D de 0.3. O sinal $u(t)$ deve ser persistentemente excitante de ordem p , ou seja, seu espectro deverá ser diferente de zero em p frequências no intervalo

$-\pi \leq \omega \leq \pi$ (CAMPESTRINI, 2010). Logo, o sinal de controle é ajustado como uma onda quadrada de valor médio $D = 0.3$, período $T = 80ms$ e amplitude de 0.04. A resposta em malha aberta é apresentada na Figura 8, onde o t_s encontrado é de cerca de $14.3ms$, sem *overshoot*.

Figura 8 – Ensaio em malha aberta.



Fonte: O autor, 2023.

3.2.2 Experimento em malha fechada

Para a realização da coleta de dados em malha fechada, um controlador proporcional k_p foi adicionado a malha de controle. Os valores que esse controlador pode atingir e ainda assegurar a estabilidade do sistema são definidos em (REMES, 2021) a partir da relação

$$k_p < \frac{1}{G_{d0}}. \quad (18)$$

Enfatiza-se que um valor de k_p muito inferior a condição limitante pode produzir sinais de controle de amplitude pequena. Em contrapartida, um valor muito próximo do limite pode acarretar instabilidades no sistema. Para a topologia DSRAC, a restrição (18) é sujeita apenas aos valores de n , D , V_i e V_o , que representam o ponto de operação utilizado na coleta dos dados.

Com os parâmetros presentes na Tabela 1, o $k_{p_{max}}$ definido é de 175×10^{-3} . Neste trabalho, examinou-se controladores proporcionais em diferentes faixas de valores ($k_p = 1.58 \times 10^{-3}$, $k_p = 43.75 \times 10^{-3}$ e $k_p = 87.50 \times 10^{-3}$). Seguindo as diretrizes de (REMES, 2021), o maior valor de k_p utilizado foi 50% do $k_{p_{max}}$.

O sinal de referência $r(t)$ aplicado é do tipo onda quadrada com valor médio em V_o , período $T \approx 66.66ms$, e amplitude de 5% de V_o (4.43V).

3.2.3 Escolha de parâmetros do Modelo de Referência

O modelo de referência é responsável pela dinâmica do sistema em malha fechada, por esse motivo a sua definição é uma das partes cruciais do projeto. Em (CAMPESTRINI; RODRIGUES; BAZANELLA, 2014) definiu-se um algoritmo que habilita o usuário a definir qual a $T_d(z)$ ideal para o comportamento desejado do sistema.

Neste trabalho considerou-se modelos de primeira e segunda ordem mencionados na referência citada, demonstrados na Tabela 2. Vale ressaltar que foram escolhidas funções de transferências tais que $|T_d(1)| = 1$, garantindo erro nulo no seguimento de referências constantes em regime permanente. Através do uso de polos estritamente reais e de grau relativo maior que zero, teoricamente se confirma um *overshoot* nulo e liberdade no posicionamento do polo dominante (p_d) para respeitar restrições de t_s .

Tabela 2 – Configurações de modelo de referência.

$T_d(z)$	<i>Overshoot</i>	t_s
$\frac{(1-p_d)z^K}{(z-p_d)}$	Não apresenta	Depende do polo p_d
$\frac{(1-p_{d1})(1-p_{d2})z^K}{(z-p_{d1})(z-p_{d2})}$	Não apresenta	Depende de p_{d1} dominante

Fonte: O autor, 2023.

O cálculo do polo dominante para $T_d(z)$ de primeira ordem foi baseado no trabalho (REMES, 2021)(19), onde t_{so} representa o tempo de acomodação do sistema em malha aberta, T_s o tempo de amostragem e $x\%$ é a porcentagem de rapidez desejada na resposta em malha fechada, em comparação com a resposta em malha aberta. Nesse caso, segue que

$$p_d = \exp\left(\frac{-4T_s}{t_{so}(1 - 0.01x\%)}\right). \quad (19)$$

Nota-se que o t_{so} pode ser determinado diretamente pela saída do sistema (obtido experimentalmente no valor de 14.3ms). Por outro lado, se a coleta de dados for realizada em malha fechada com um controlador proporcional k_p , esse tempo de acomodação pode ser estimado por

$$t_{so} \approx t_{sc}(1 - G_{d0}k_p), \quad (20)$$

onde t_{sc} é o tempo de acomodação medido no ensaio com o controlador proporcional.

Para $T_d(z)$ de segunda ordem, o polo depende do valor de t_{so} conforme equação apresentada em (CAMPESTRINI; RODRIGUES; BAZANELLA, 2014) (21), onde p_{z1} é

tido como o polo dominante que gera o t_{so} da planta. Então, o p_{d1} é fixado como o polo de $T_d(z)$ cuja dinâmica é $K\%$ mais rápida do que vista no sistema em malha aberta, para assegurar a dominância de p_{d1} basta estipular que p_{d2} seja no mínimo 4 vezes mais rápido do que p_{d1} .

$$p_{d1} = p_{z1} \left(1 + \frac{K\%}{100}\right) \quad (21)$$

Os valores $K\%$ examinados para o modelo de referência ideal foram de 5% a 85% com incrementos de 10%. No que diz respeito ao grau relativo da planta, em (SALATI, 2021) foi identificado um modelo de quarta ordem com $GR = 1$ apresentado em (22). Avaliou-se então, casos de $GR = 1$ e também $GR = 0$ e $GR = 2$.

$$G(z) = \frac{0.2562z^3 - 0.5088z^2 + 0.5458z - 0.2224}{z^4 - 1.656z^3 - 0.2645z^2 + 1.656z - 0.7353} \quad (22)$$

As Tabelas 3 e 4 apresentam os modelos de referência considerados com os seus respectivos tempos de acomodação. Os valores desejados de tempo de acomodação muito menores do que em malha aberta são uma extrapolação para verificar o pior caso, que não deve ser feito na prática.

Tabela 3 – Modelos de referência de primeira ordem.

<i>redução t_s (%)</i>	$T_d(z)$	t_s (ms)
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7
45	$\frac{0.01}{(z-0.99)}$	7.8
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 4 – Modelos de referência de segunda ordem.

<i>redução</i> t_s (%)	$T_d(z)$			t_s (ms)
	GR 0	GR 1	GR 2	
5	$\frac{0.00013601z^2}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	$\frac{0.00013601z}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3
15	$\frac{0.00016293z^2}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	$\frac{0.00016293z}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1
25	$\frac{0.00019222z^2}{(z-0.993)(z-0.9724)}$	$\frac{0.00019222z}{(z-0.993)(z-0.9724)}$	$\frac{0.00019222}{(z-0.993)(z-0.9724)}$	12.0
35	$\frac{0.0002239z^2}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	$\frac{0.0002239z}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	$\frac{0.0002239}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1
45	$\frac{0.00025794z^2}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	$\frac{0.00025794z}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4
55	$\frac{0.00029433z^2}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	$\frac{0.00029433z}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7
65	$\frac{0.00033307z^2}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	$\frac{0.00033307z}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1
75	$\frac{0.00037415z^2}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	$\frac{0.00037415z}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6
85	$\frac{0.00041755z^2}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	$\frac{0.00041755z}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1

Fonte: O autor, 2023.

3.3 Projeto do controlador VRFT

Partindo de um único experimento é feita uma manipulação nos sinais para que sejam enviados ao algoritmo apenas dados ao redor do ponto de operação, ou seja, subtraí-se os valores médios D e V_o dos sinais $u(t)$ e $y(t)$ respectivamente. Em seguida, diferentes modelos de referência (Tabelas 3 e 4) são aplicados no código do VRFT, e finalmente encontram-se os controladores desejados.

O experimento é feito com variações de configuração, de estrutura PID e PI e com/sem filtro. Após a sintonia de controle pelo VRFT é realizado um estudo sobre quais fatores de simulação apresentaram o melhor resultado em malha fechada.

3.4 Projeto do controlador VDFT

O projeto de um controlador pelo método do VDFT também é feito a partir de dados ao redor do ponto de operação. As configurações de experimento são idênticas as já apresentadas no método do VRFT. No entanto, a escolha de um modelo para rejeitar distúrbios é mais difícil do que a definição de um modelo para seguimento de referência.

A estimativa de $Q_d(z)$ pode ser feita através do projeto de um controlador por VRFT para uma referência desejada e a sua $T_d(z)$, como demonstrado em (ECKHARD; CAMPESTRINI; BOEIRA, 2018) pela relação (23). Desse modo, explora-se a aproximação da resposta do sistema em malha fechada em relação a distúrbios de entrada. Determina-se

que $Q_d(z)$ deve conter um zero em 1 para garantia da rejeição total de sinais constantes e que o ganho do modelo altera a amplitude da resposta do sistema em relação a distúrbios.

$$Q_d(z) = \frac{T_d(z)}{C_{vrft}(z)} \quad (23)$$

Dado que o modelo $Q_d(z)$ definido por essa abordagem depende de dados originados do VRFT, alterações na sua estrutura serão avaliadas para investigar os efeitos na resposta em malha fechada.

4 Resultados do método VRFT

Neste capítulo são apresentados os ensaios feitos para a validação do método de controle VRFT para a sintonia de controladores. A metodologia proposta têm seus resultados demonstrados no formato de gráficos e tabelas. A análise de dados é baseada nos critérios de desempenho $J^{VR}(\rho)$, tempo de acomodação em malha fechada e *overshoot* presente na resposta. Destaca-se que o estudo de $J_y(\rho)$ também é contemplado em cada simulação e a análise do comportamento do sistema em relação a distúrbios de tensão de entrada é feita pelo valor do custo $J_{v_{in}}$ ¹ e de carga pelo valor do custo J_{r_o} ².

Na análise da resposta em relação a distúrbios de saída foi adicionado um degrau de carga capaz de variar o valor do resistor R_o de 250Ω para 500Ω . Do mesmo modo, um degrau de tensão de amplitude de $1V$ foi adicionado a V_{in} para avaliar a resposta em relação a distúrbios de entrada, o valor do salto foi escolhido para manter o sistema na faixa onde ele é aproximadamente linear. Ambos os degraus foram acionados com o mesmo tempo de duração para possibilitar a comparação entre as respostas.

4.1 Efeito do ganho utilizado na coleta de dados

Essa seção tem como objetivo avaliar o efeito do ganho utilizado na coleta de dados em malha fechada no controlador resultante do método VRFT. Nesse caso, os resultados completos obtidos com diferentes controladores proporcionais ($k_p = 1.58 \times 10^{-3}$, $k_p = 43.75 \times 10^{-3}$ e $k_p = 87.50 \times 10^{-3}$) na malha de controle inicial, estão localizadas no Apêndice B.2.

Tabela 5 – PID gerado por $T_d(z)_{25\%} = \frac{0.007}{(z-0.993)}$.

k_p <i>coleta de dados (%)</i>	<i>Controlador</i> VRFT	t_s <i>(ms)</i>	$J^{VR}(\rho)$	<i>Overshoot</i> <i>(%)</i>	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
1.58×10^{-3}	$\frac{0.035860(z-0.9953)(z-0.6392)}{z(z-1)}$	9.7	0.0059	-	0.5463	0.1328	2.6492
43.75×10^{-3}	$\frac{0.139443(z-0.9971)(z-0.8780)}{z(z-1)}$	20.2	0.0220	-	0.5642	0.1401	2.5283
87.50×10^{-3}	$\frac{0.176291(z-0.9976)(z-0.8864)}{z(z-1)}$	22.8	0.0335	-	0.5087	0.1287	2.3913

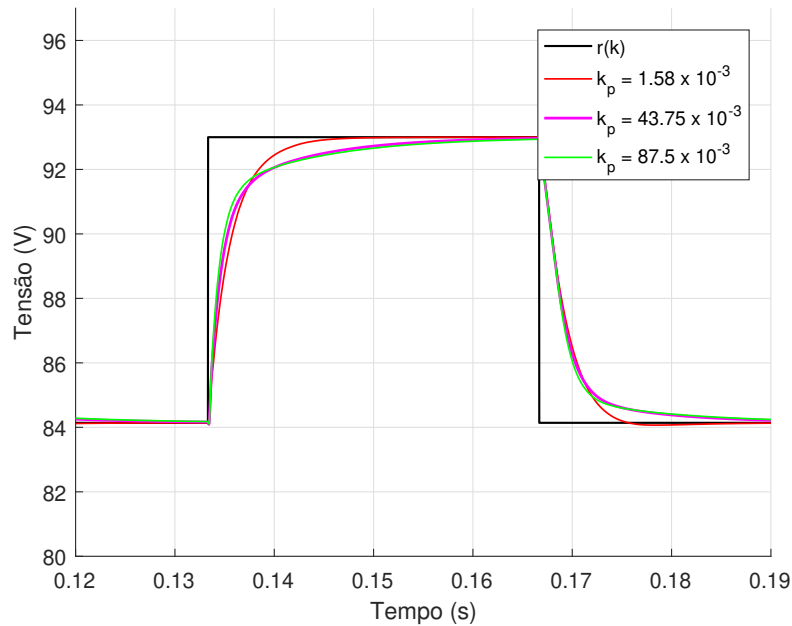
Fonte: O autor, 2023.

Na Figura 9 apresenta-se uma comparação da saída em malha fechada do sistema controlado por PIDs da Tabela 5 projetados a partir de uma $T_d(z)$ de primeira ordem com tempo de acomodação 25% menor do que em malha aberta. Os resultados completos estão nas Tabelas 45, 61 e 73.

¹ Critério de desempenho em relação aos distúrbios de entrada

² Critério de desempenho em relação aos distúrbios de saída

Figura 9 – Resposta em malha fechada com diferentes controladores na coleta de dados.



Fonte: O autor, 2023.

Verifica-se que o controlador gerado a partir da coleta de dados feita em malha fechada com um $k_p = 1.58 \times 10^{-3}$ teve resultados superiores em relação aos outros valores de k_p . Analisando os parâmetros de resposta em malha fechada demonstra-se, sobretudo, que o tempo de acomodação atingido com o uso do $k_p = 1.58 \times 10^{-3}$ é menor. No que se refere ao *overshoot*, os resultados obtidos com diferentes controladores na geração de dados não implicaram significativas variações na resposta.

Conclui-se, portanto, que o aumento de k_p reflete negativamente no tempo de acomodação do sistema, sem diminuir as métricas de custo. Assim, o levantamento de dados foi separado em dois grupos para facilitar o estudo de caso. O ensaio com dados coletados em malha aberta e o ensaio com dados coletados em malha fechada com o proporcional $k_p = 1.58 \times 10^{-3}$.

4.2 Sintonia de controladores pelo ensaio em malha aberta

Nesta seção demonstra-se os controladores projetados por VRFT baseado em dados coletados em malha aberta, a influência do filtro $L(z)$ na resposta em malha fechada e o melhor controle designado para seguimento de referência.

4.2.1 Influência do filtro

Os ensaios com $T_d(z)$ de primeira ordem e atuação do filtro demonstram uma grande variação de desempenho na resposta conforme pode ser observado nas Tabelas 6 e 7 para controladores PID e PI, respectivamente. Quanto mais rápida é a dinâmica do modelo de referência, maior é o *overshoot* e t_s da resposta, ao passo que o valor do custo $J^{VR}(\rho)$ diminui. Sem o filtro, a resposta consegue apresentar a dinâmica determinada pelo modelo com um $J^{VR}(\rho)$ que aumenta até que o sistema sature para modelos mais rápidos que $T_d(z)_{65\%}$.

Em contrapartida, para simulações com modelo de referência de segunda ordem (Tabelas 8 e 9), o sinal de controle não satura e o valor de $J^{VR}(\rho)$ mantêm-se praticamente constante, mesmo seguindo dinâmicas mais rápidas. Também repara-se na presença de *overshoot* e t_s maiores nos casos que aplicam a filtragem dos dados.

Após o exame dos resultados, a característica mais significativa observada é que o uso do filtro $L(z)$ minimiza o valor do custo $J^{VR}(\rho)$ sob todas as configurações de ensaio. Além disso, em controladores gerados por $T_d(z)$ de segunda ordem, o uso da filtragem não interfere na resposta tanto quanto em controladores gerados por $T_d(z)$ de primeira ordem, conforme exibido nas Figuras 10 e 11. Isso se justifica pelo fato de que, para a $T_d(z)$ de segunda ordem, o controlador está mais próximo da classe ideal do que para a $T_d(z)$ de primeira ordem. O leitor pode verificar os resultados completos nas Tabelas 33 a 40 localizadas no Apêndice B.1.

Em relação à estrutura do controlador, conclui-se que o uso de um PID não representa vantagens para a resposta do sistema, o *overshoot*, t_s , e custo em geral de ambas as estruturas são praticamente equivalentes. Diante disso, observa-se que o grau de liberdade adicionado pela ação derivativa não faz com que o método VRFT resulte em uma melhor estimativa do controlador ideal.

Tabela 6 – Análise da atuação do filtro para PID gerado por $T_d(z)$ de primeira ordem.

$T_d(z)$	<i>Com filtro</i>				<i>Sem Filtro</i>			
	<i>Controlador</i> <i>VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$	<i>Controlador</i> <i>VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$
$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	$\frac{0.007977(z-0.9946)(z+0.1635)}{z(z-1)}$	9.9	-	0.0033	$\frac{0.010937(z-0.9952)(z+0.0310)}{z(z-1)}$	10.1	-	0.1707
$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	$\frac{0.008524(z-0.9944)(z+0.1933)}{z(z-1)}$	8.4	-	0.0033	$\frac{0.012114(z-0.9951)(z+0.0690)}{z(z-1)}$	8.7	-	0.1717
$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	$\frac{0.008524(z-0.9944)(z+0.1933)}{z(z-1)}$	8.4	-	0.0033	$\frac{0.012114(z-0.9951)(z+0.0690)}{z(z-1)}$	8.7	-	0.1717
$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	$\frac{0.009307(z-0.9939)(z+0.2349)}{z(z-1)}$	6.5	1.80	0.0031	$\frac{0.014247(z-0.9950)(z+0.1329)}{z(z-1)}$	6.6	-	0.1737
$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	$\frac{0.009574(z-0.9936)(z+0.2489)}{z(z-1)}$	11.7	2.37	0.0030	$\frac{0.015223(z-0.9949)(z+0.1602)}{z(z-1)}$	5.9	-	0.1747
$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	$\frac{0.009918(z-0.9929)(z+0.2677)}{z(z-1)}$	11.8	3.50	0.0027	$\frac{0.017027(z-0.9948)(z+0.2076)}{z(z-1)}$	4.7	-	0.1767
$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	$\frac{0.010099(z-0.9915)(z+0.2823)}{z(z-1)}$	11.4	6.32	0.0021	$\frac{0.020175(z-0.9945)(z+0.2818)}{z(z-1)}$	3.4	-	0.1805
$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	$\frac{0.009748(z-0.9893)(z+0.2778)}{z(z-1)}$	10.5	10.27	0.0014	$\frac{0.024071(z-0.9940)(z+0.3603)}{z(z-1)}$	-	Satura	-
$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	$\frac{0.008250(z-0.9842)(z+0.2409)}{z(z-1)}$	13.8	17.83	0.0006	$\frac{0.031168(z-0.9928)(z+0.4740)}{z(z-1)}$	-	Satura	-

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 7 – Análise da atuação do filtro para PI gerado por $T_d(z)$ de primeira ordem.

$T_d(z)$	<i>Com filtro</i>				<i>Sem Filtro</i>			
	<i>Controlador</i> <i>VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$	<i>Controlador</i> <i>VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$
$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	$\frac{0.009269(z-0.9946)}{(z-1)}$	9.9	-	0.0033	$\frac{0.011274(z-0.9952)}{(z-1)}$	10.2	-	0.1708
$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	$\frac{0.010155(z-0.9944)}{(z-1)}$	8.3	-	0.0033	$\frac{0.012945(z-0.9951)}{(z-1)}$	8.7	-	0.1718
$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	$\frac{0.010155(z-0.9944)}{(z-1)}$	8.3	-	0.0033	$\frac{0.012945(z-0.9951)}{(z-1)}$	8.7	-	0.1718
$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	$\frac{0.011463(z-0.9938)}{(z-1)}$	6.5	1.80	0.0031	$\frac{0.016128(z-0.9950)}{(z-1)}$	8.7	-	0.1738
$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	$\frac{0.011919(z-0.9935)}{(z-1)}$	11.8	2.37	0.0030	$\frac{0.017643(z-0.9949)}{(z-1)}$	5.9	-	0.1748
$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	$\frac{0.012521(z-0.9929)}{(z-1)}$	11.8	3.62	0.0027	$\frac{0.020533(z-0.9948)}{(z-1)}$	4.8	-	0.1768
$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	$\frac{0.012869(z-0.9915)}{(z-1)}$	11.4	6.32	0.0021	$\frac{0.025801(z-0.9945)}{(z-1)}$	3.4	-	0.1807
$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	$\frac{0.012342(z-0.9892)}{(z-1)}$	10.5	10.49	0.0014	$\frac{0.032627(z-0.9940)}{(z-1)}$	-	Satura	-
$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	$\frac{0.010086(z-0.9839)}{(z-1)}$	13.9	18.17	0.0006	$\frac{0.045592(z-0.9928)}{(z-1)}$	-	Satura	-

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 8 – Análise da atuação do filtro para PID gerado por $T_d(z)$ de segunda ordem.

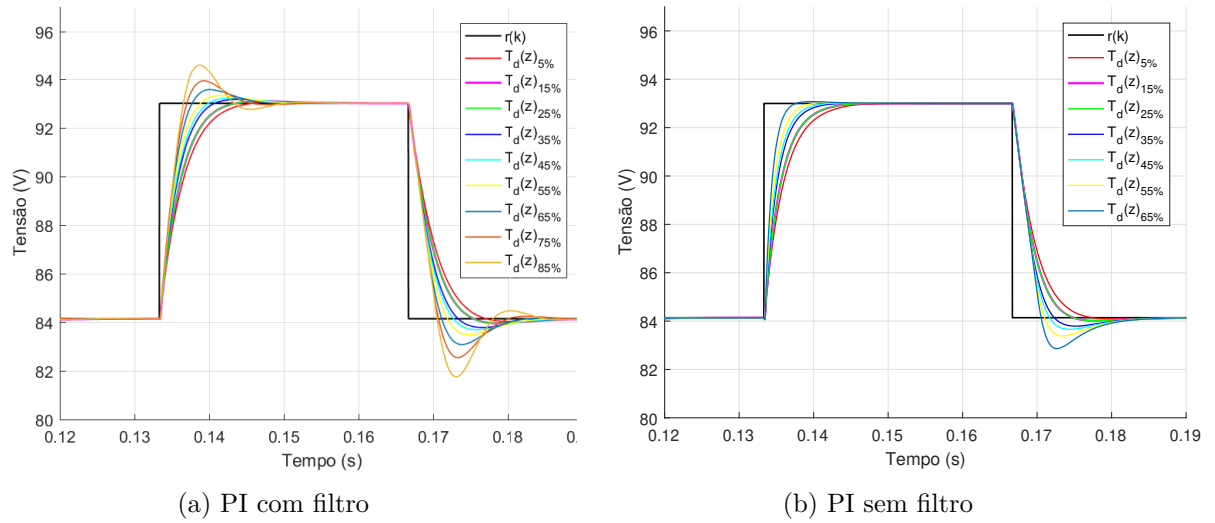
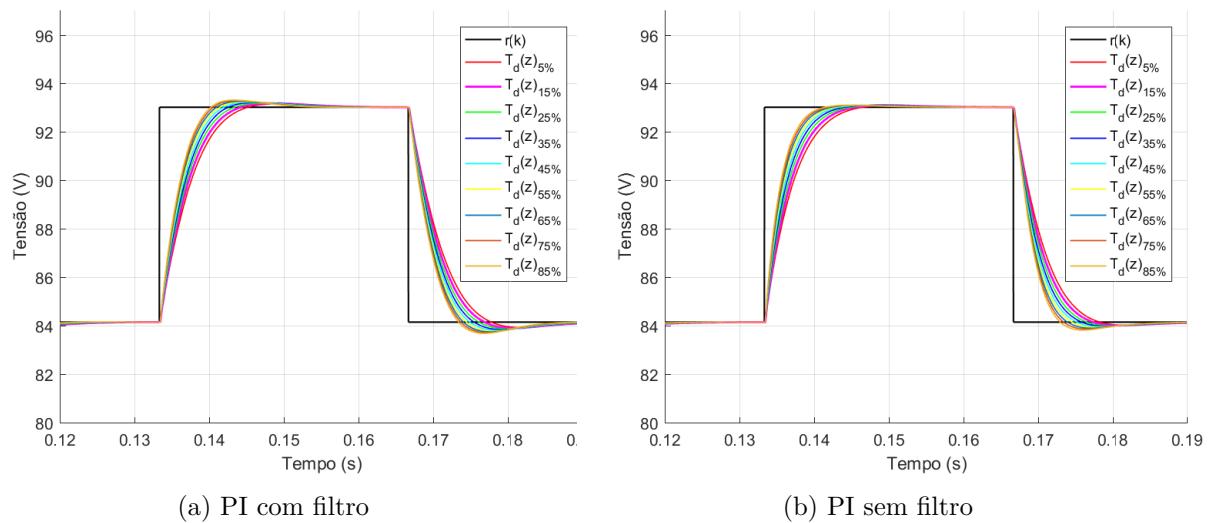
$T_d(z)$	<i>Com filtro</i>				<i>Sem Filtro</i>			
	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$
$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	$\frac{0.004526(z-0.9936)(z+0.4314)}{z(z-1)}$	10.5	1.72	0.0042	$\frac{0.005706(z-0.9943)(z+0.3157)}{z(z-1)}$	10.9	-	0.1813
$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	$\frac{0.005010(z-0.9935)(z+0.4011)}{z(z-1)}$	9.6	1.84	0.0043	$\frac{0.006359(z-0.9943)(z+0.3039)}{z(z-1)}$	10.0	-	0.1812
$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	$\frac{0.005455(z-0.9935)(z+0.3783)}{z(z-1)}$	8.9	1.98	0.0044	$\frac{0.006999(z-0.9944)(z+0.2948)}{z(z-1)}$	9.4	-	0.1811
$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	$\frac{0.005865(z-0.9934)(z+0.3608)}{z(z-1)}$	14.7	2.22	0.0044	$\frac{0.007623(z-0.9944)(z+0.2881)}{z(z-1)}$	8.7	-	0.1811
$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	$\frac{0.006240(z-0.9934)(z+0.3471)}{z(z-1)}$	14.6	2.40	0.0044	$\frac{0.008230(z-0.9944)(z+0.2835)}{z(z-1)}$	8.2	-	0.1811
$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	$\frac{0.006583(z-0.9933)(z+0.3361)}{z(z-1)}$	14.4	2.60	0.0044	$\frac{0.008820(z-0.9944)(z+0.2805)}{z(z-1)}$	7.7	-	0.1811
$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	$\frac{0.006895(z-0.9932)(z+0.3271)}{z(z-1)}$	14.3	2.86	0.0044	$\frac{0.009394(z-0.9944)(z+0.2789)}{z(z-1)}$	7.3	-	0.1812
$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	$\frac{0.007179(z-0.9931)(z+0.3196)}{z(z-1)}$	14.2	3.16	0.0044	$\frac{0.009950(z-0.9944)(z+0.2784)}{z(z-1)}$	6.9	1.00	0.1814
$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	$\frac{0.007436(z-0.9930)(z+0.3132)}{z(z-1)}$	13.9	3.41	0.0044	$\frac{0.010491(z-0.9944)(z+0.2784)}{z(z-1)}$	6.5	1.01	0.1815

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 9 – Análise da atuação do filtro para PI gerado por $T_d(z)$ de segunda ordem.

$T_d(z)$	<i>Com filtro</i>				<i>Sem Filtro</i>			
	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$
$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	$\frac{0.006463(z-0.9936)}{(z-1)}$	10.5	1.73	0.0042	$\frac{0.007496(z-0.9943)}{(z-1)}$	10.9	-	0.1814
$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	$\frac{0.007002(z-0.9935)}{(z-1)}$	9.6	1.86	0.0043	$\frac{0.008279(z-0.9943)}{(z-1)}$	10.1	-	0.1813
$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	$\frac{0.007501(z-0.9935)}{(z-1)}$	8.9	2.00	0.0044	$\frac{0.009048(z-0.9944)}{(z-1)}$	9.3	-	0.1812
$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	$\frac{0.007961(z-0.9934)}{(z-1)}$	15.0	2.23	0.0044	$\frac{0.009805(z-0.9944)}{(z-1)}$	8.8	-	0.1812
$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	$\frac{0.008385(z-0.9933)}{(z-1)}$	15.8	2.43	0.0044	$\frac{0.010548(z-0.9944)}{(z-1)}$	8.2	-	0.1812
$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	$\frac{0.008773(z-0.9932)}{(z-1)}$	14.6	2.64	0.0044	$\frac{0.011278(z-0.9944)}{(z-1)}$	7.7	-	0.1812
$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	$\frac{0.009126(z-0.9931)}{(z-1)}$	14.4	2.87	0.0044	$\frac{0.011996(z-0.9944)}{(z-1)}$	7.5	-	0.1814
$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	$\frac{0.009448(z-0.9930)}{(z-1)}$	14.0	3.18	0.0044	$\frac{0.012701(z-0.9944)}{(z-1)}$	6.9	1.02	0.1815
$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	$\frac{0.009739(z-0.9929)}{(z-1)}$	13.9	3.44	0.0044	$\frac{0.013394(z-0.9944)}{(z-1)}$	6.5	1.02	0.1817

Fonte: O autor, 2023.

Figura 10 – Controle projetado a partir de $T_d(z)$ de primeira ordem.Figura 11 – Controle projetado a partir de $T_d(z)$ de segunda ordem.

Fonte: O autor, 2023.

4.2.2 Avaliação de desempenho do seguimento de referência

Baseando-se na análise apresentada anteriormente, o controlador mais simples e próximo ao ideal pertence a classe PI. Para demonstrar a similaridade entre as respostas do sistema controlado por PI e PID, os controladores selecionados são expostos nas Tabelas 10 e 11 gerados a partir de $T_d(z)$ de primeira e segunda ordem, respectivamente.

Os ensaios realizados a partir de uma dada $T_d(z)$ de segunda ordem, variando apenas o seu grau relativo, geram resultados similares. Logo, por simplificação, são utilizados apenas modelos de referência de $GR = 0$.

Tabela 10 – Controle projetado a partir de $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.

<i>Classe</i>	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	<i>Overshoot</i> (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
PID	$\frac{0.008524(z-0.9944)(z+0.1933)}{z(z-1)}$	8.4	0.0033	-	0.6772	0.1652	3.0754
PI	$\frac{0.010155(z-0.9944)}{(z-1)}$	8.3	0.0033	-	0.6770	0.1652	3.0709

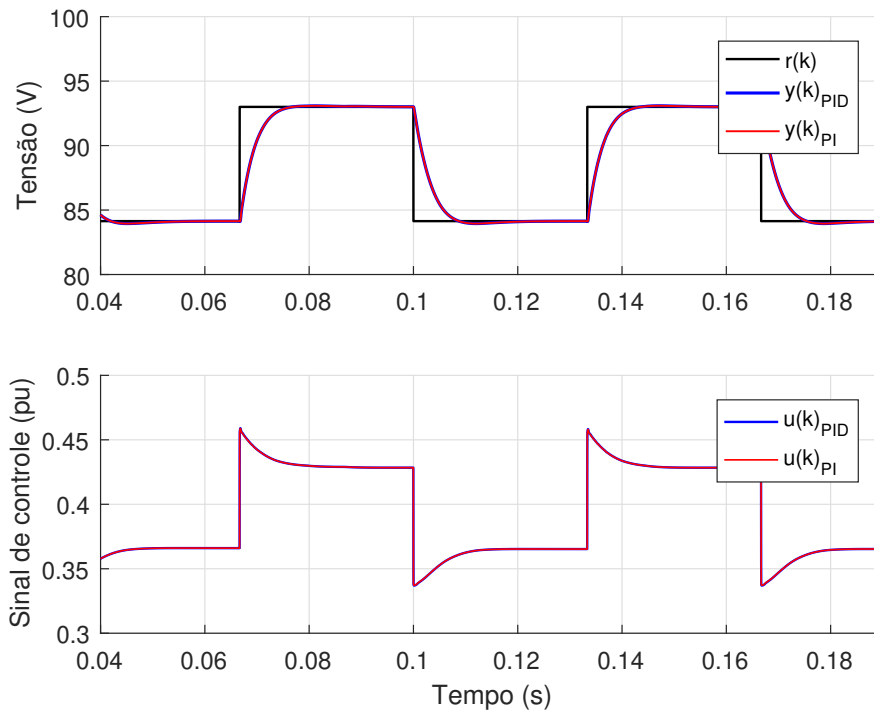
Fonte: O autor, 2023.

Tabela 11 – Controle projetado a partir de $T_d(z)_{25\%}$ de segunda ordem.

<i>Classe</i>	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	<i>Overshoot</i> (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
PID	$\frac{0.005688(z-0.9936)(z+0.3444)}{z(z-1)}$	8.9	0.0043	-	0.9167	0.2243	3.7593
PI	$\frac{0.007630(z-0.9935)}{(z-1)}$	8.9	0.0043	1.35	0.9165	0.2243	3.7529

Fonte: O autor, 2023.

Figura 12 – Resultados de simulação do sistema em malha fechada com controladores projetados por $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.

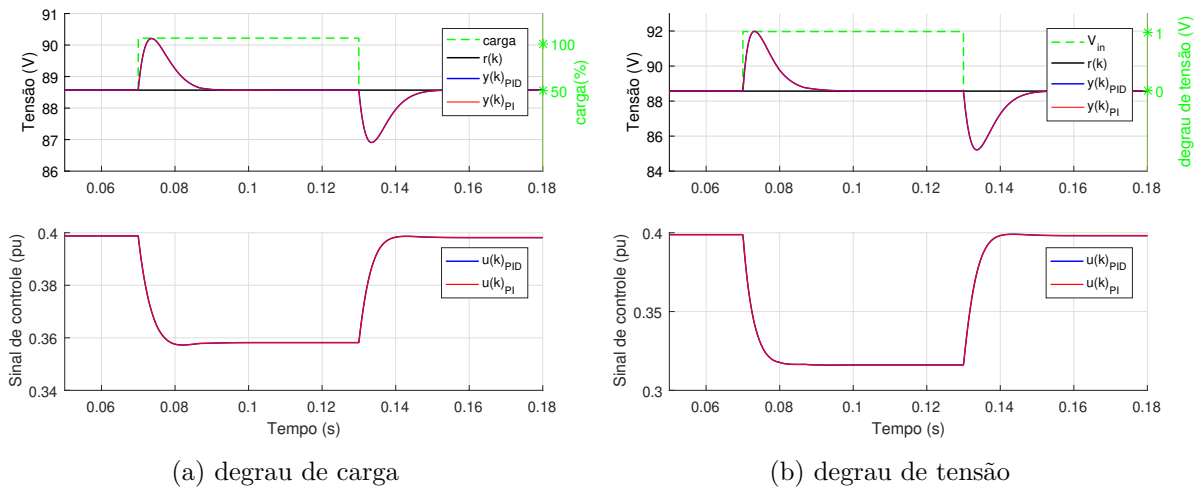


Fonte: O autor, 2023.

A análise dos resultados com $T_d(z)$ de primeira ordem evidencia que o controle baseado na $T_d(z)_{25\%}$ foi o mais adequado. O t_s alcançado foi cerca de 40% menor do que a dinâmica em malha aberta, sem a presença de *overshoot* na resposta. Nas Figuras 12 e 13 demonstra-se o sistema em malha fechada e o comportamento em relação a distúrbios, respectivamente. O tempo para rejeição de um degrau de carga é cerca de 19.1ms enquanto que para tensão de entrada é de 21.8ms. Por último, a Figura 14 apresenta a comparação entre o desempenho desejado e o obtido para o sistema, que comprova que o controle projetado atende os requisitos de projeto.

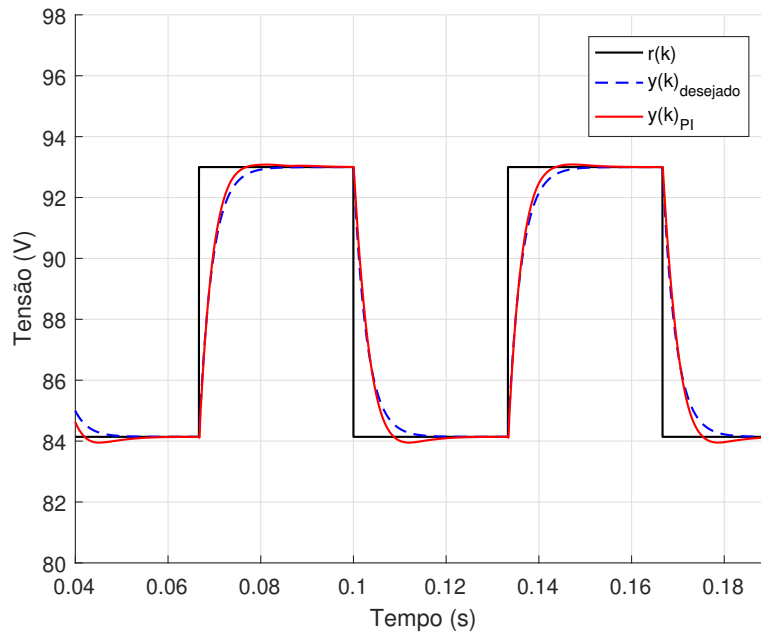
Avaliando as respostas geradas a partir de $T_d(z)$ de segunda ordem, também foi escolhido o controle gerado a partir da $T_d(z)_{25\%}$. O t_s encontrado foi cerca de 37% menor do que em malha aberta. Na Figura 15 apresenta-se o sistema em malha fechada e na Figura 16 o efeito das perturbações. O tempo que o sistema leva para a rejeição de distúrbios de carga e tensão de entrada é de cerca de 17.8ms e 19.8ms, respectivamente. Finalmente, compara-se o comportamento desejado e obtido na Figura 17, mais uma vez atingindo os requisitos de projeto.

Figura 13 – Resultados de simulação para distúrbios.



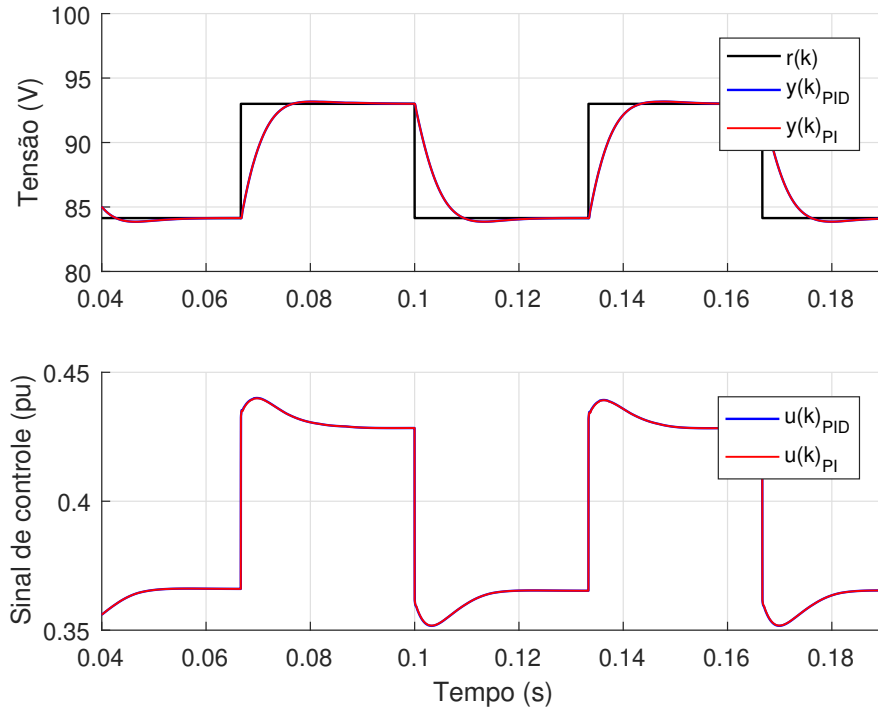
Fonte: O autor, 2023.

Figura 14 – Comparação entre o desempenho desejado e obtido para a classe PI.



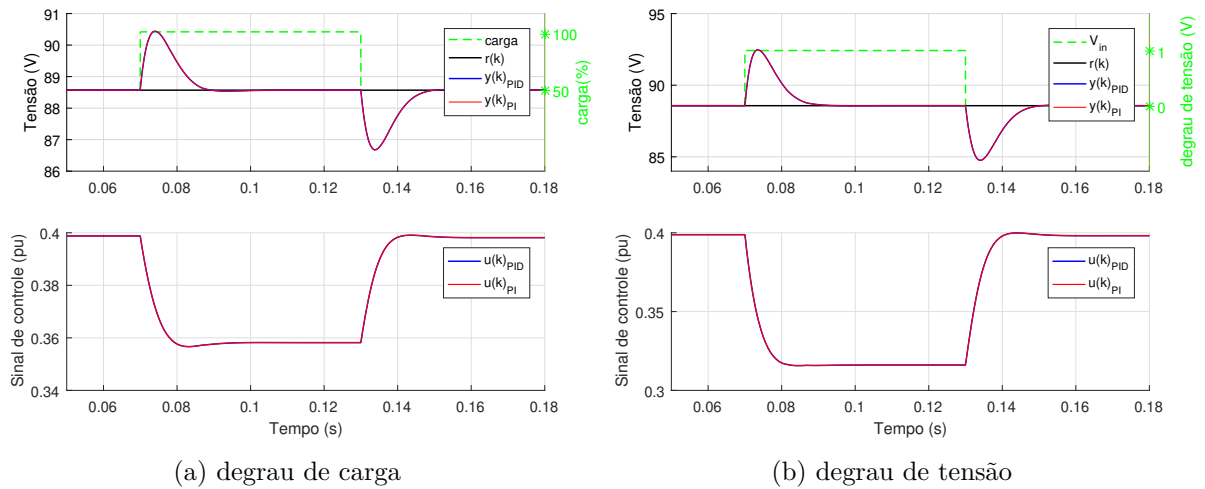
Fonte: O autor, 2023.

Figura 15 – Resultados de simulação do sistema em malha fechada com controladores projetados por $T_d(z)_{25\%}$ de segunda ordem.



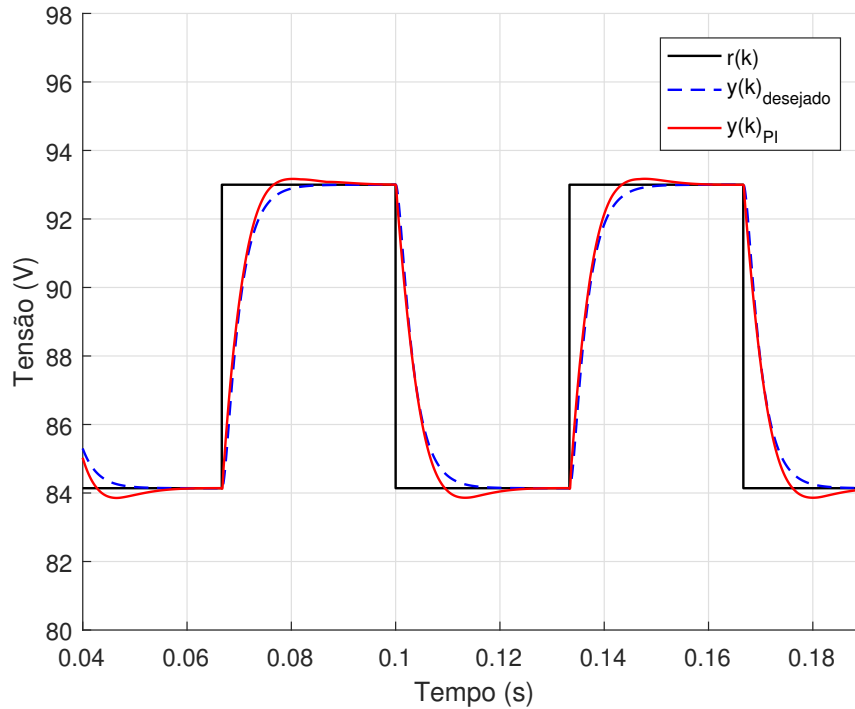
Fonte: O autor, 2023.

Figura 16 – Resultados de simulação para distúrbios.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 17 – Comparação entre o desempenho desejado e obtido para a classe PI.



Fonte: O autor, 2023.

4.3 Sintonia de controladores pelo ensaio em malha fechada

Nesta seção são analisados os controladores projetados por VRFT a partir da base de dados coletada em malha fechada por um proporcional $k_p = 1.58 \times 10^{-3}$, a análise do filtro $L(z)$ e o melhor controle para seguimento de referência.

4.3.1 Influência do filtro

Nos ensaios a partir de $T_d(z)$ de primeira ordem ilustrados nas Tabelas 12 e 13 observa-se que ocorre a saturação do sistema quando a dinâmica desejada torna-se mais rápida do que $T_d(z)_{55\%}$. Em contrapartida, para ensaios baseados em $T_d(z)$ de segunda ordem (Tabelas 14 e 15) o sinal de controle não satura e com a aplicação do filtro, para a classe PI, o t_s diminui e surgem pequenos valores de *overshoot*.

Além disso, os controladores PID e PI gerados a partir de $T_d(z)$ de primeira ordem apresentam valores de $J^{VR}(\rho)$ similares, variando apenas com a dinâmica do modelo de referência, enquanto aqueles originados por $T_d(z)$ de segunda ordem exibem diferentes faixas de valores para o $J^{VR}(\rho)$. Para um PID, o valor de $J^{VR}(\rho)$ é cerca de quatro vezes maior do que para um PI e varia com a dinâmica de $T_d(z)$.

O uso de $L(z)$ minimiza os valores de custo $J^{VR}(\rho)$. Além disso, as Figuras 18 e 19 mostram que o filtro não causa uma alteração significativa na resposta do sistema. Isso

indica que o controlador ideal está próximo à classe à qual ele pertence. O leitor pode verificar os resultados completos nas Tabelas 45 a 52 localizadas no Apêndice B.2.

Tabela 12 – Análise da atuação do filtro para PID gerado por $T_d(z)$ de primeira ordem.

$T_d(z)$	<i>Com filtro</i>				<i>Sem Filtro</i>			
	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$
$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	$\frac{0.030342(z-0.9953)(z-0.6335)}{z(z-1)}$	11.1	-	0.0052	$\frac{0.037814(z-0.9954)(z-0.7020)}{z(z-1)}$	11.3	-	0.1537
$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	$\frac{0.035860(z-0.9953)(z-0.6392)}{z(z-1)}$	9.7	-	0.0059	$\frac{0.042778(z-0.9954)(z-0.6929)}{z(z-1)}$	9.9	-	0.1560
$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	$\frac{0.035860(z-0.9953)(z-0.6392)}{z(z-1)}$	9.7	-	0.0059	$\frac{0.042778(z-0.9954)(z-0.6929)}{z(z-1)}$	9.9	-	0.1560
$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	$\frac{0.047539(z-0.9953)(z-0.6517)}{z(z-1)}$	7.7	-	0.0077	$\frac{0.053068(z-0.9953)(z-0.6821)}{z(z-1)}$	7.8	-	0.1607
$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	$\frac{0.053633(z-0.9953)(z-0.6576)}{z(z-1)}$	7.0	-	0.0087	$\frac{0.058376(z-0.9953)(z-0.6792)}{z(z-1)}$	7.0	-	0.1630
$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	$\frac{0.066152(z-0.9953)(z-0.6682)}{z(z-1)}$	5.7	-	0.0108	$\frac{0.069278(z-0.9954)(z-0.6792)}{z(z-1)}$	5.8	-	0.1679
$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	$\frac{0.091763(z-0.9953)(z-0.6336)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	$\frac{0.091968(z-0.9954)(z-0.6752)}{z(z-1)}$	-	Satura	-
$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	$\frac{0.129638(z-0.9953)(z-0.6953)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	$\frac{0.127296(z-0.9954)(z-0.6782)}{z(z-1)}$	-	Satura	-
$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	$\frac{0.214533(z-0.9953)(z-0.6978)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	$\frac{0.216397(z-0.9953)(z-0.6829)}{z(z-1)}$	-	Satura	-

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 13 – Análise da atuação do filtro para PI gerado por $T_d(z)$ de primeira ordem.

$T_d(z)$	<i>Com filtro</i>				<i>Sem Filtro</i>			
	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$
$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	$\frac{0.011213(z-0.9954)}{(z-1)}$	10.8	-	0.0047	$\frac{0.011395(z-0.9954)}{(z-1)}$	10.8	-	0.1517
$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	$\frac{0.013048(z-0.9954)}{(z-1)}$	9.4	-	0.0053	$\frac{0.013278(z-0.9954)}{(z-1)}$	9.5	-	0.1538
$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	$\frac{0.013048(z-0.9954)}{(z-1)}$	9.4	-	0.0053	$\frac{0.013278(z-0.9954)}{(z-1)}$	9.5	-	0.1538
$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	$\frac{0.016708(z-0.9954)}{(z-1)}$	7.5	-	0.0066	$\frac{0.017039(z-0.9954)}{(z-1)}$	7.5	-	0.1579
$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	$\frac{0.018532(z-0.9953)}{(z-1)}$	6.8	-	0.0072	$\frac{0.018918(z-0.9954)}{(z-1)}$	6.9	-	0.1600
$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	$\frac{0.022163(z-0.9953)}{(z-1)}$	5.6	-	0.0085	$\frac{0.022671(z-0.9954)}{(z-1)}$	5.6	-	0.1640
$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	$\frac{0.029353(z-0.9953)}{(z-1)}$	-	Satura	-	$\frac{0.030166(z-0.9954)}{(z-1)}$	-	Satura	-
$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	$\frac{0.039973(z-0.9953)}{(z-1)}$	-	Satura	-	$\frac{0.041384(z-0.9954)}{(z-1)}$	-	Satura	-
$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	$\frac{0.065742(z-0.9953)}{(z-1)}$	-	Satura	-	$\frac{0.069341(z-0.9954)}{(z-1)}$	-	Satura	-

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 14 – Análise da atuação do filtro para PID gerado por $T_d(z)$ de segunda ordem.

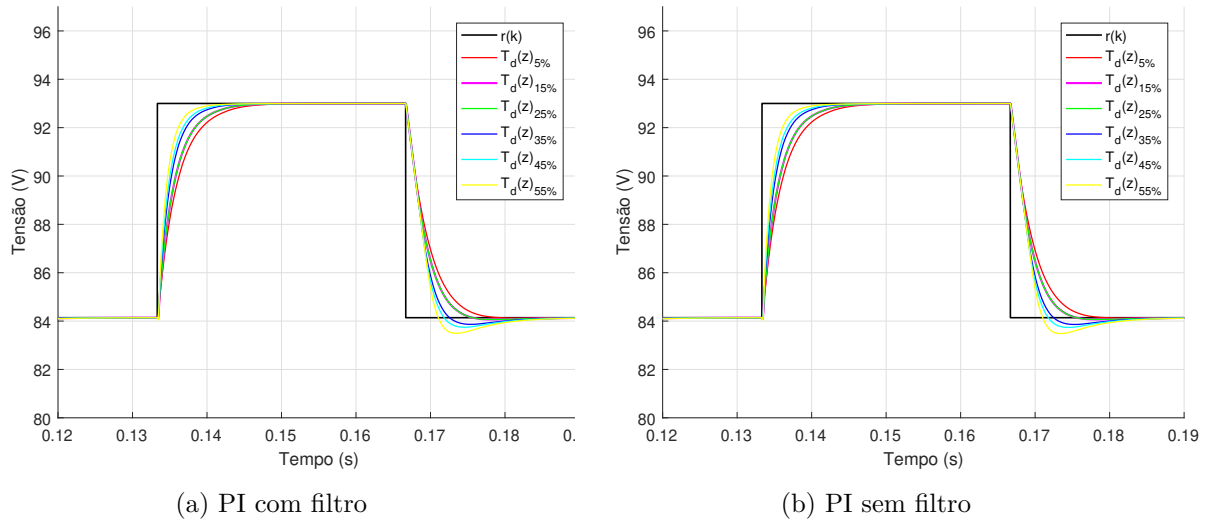
$T_d(z)$	<i>Com filtro</i>				<i>Sem Filtro</i>			
	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$
$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	$\frac{-0.143816(z-1.0538)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	10.6	-	0.0221	$\frac{-0.143871(z-1.0562)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	11.0	-	0.1725
$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	$\frac{-0.146651(z-1.0582)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	9.8	-	0.0233	$\frac{-0.148109(z-1.0603)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	10.2	-	0.1743
$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	$\frac{-0.148667(z-1.0628)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	9.1	-	0.0242	$\frac{-0.151427(z-1.0646)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	9.5	-	0.1759
$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	$\frac{-0.150024(z-1.0675)(z-0.9948)}{z(z-1)}$	8.5	-	0.0250	$\frac{-0.153998(z-1.0690)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	8.9	-	0.1774
$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	$\frac{-0.150843(z-1.0724)(z-0.9948)}{z(z-1)}$	8.0	-	0.0257	$\frac{-0.155955(z-1.0735)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	8.4	-	0.1787
$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	$\frac{-0.151213(z-1.0538)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	7.5	-	0.0263	$\frac{-0.157399(z-1.0562)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	7.9	-	0.1799
$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	$\frac{-0.151205(z-1.0538)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	7.2	-	0.0268	$\frac{-0.158409(z-1.0562)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	7.5	-	0.1811
$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	$\frac{-0.150874(z-1.0538)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	6.8	-	0.0272	$\frac{-0.159049(z-1.0562)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	7.2	-	0.1822
$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	$\frac{-0.150265(z-1.0538)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	6.5	-	0.0275	$\frac{-0.159370(z-1.0562)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	6.8	-	0.1832

Fonte: O autor, 2023.

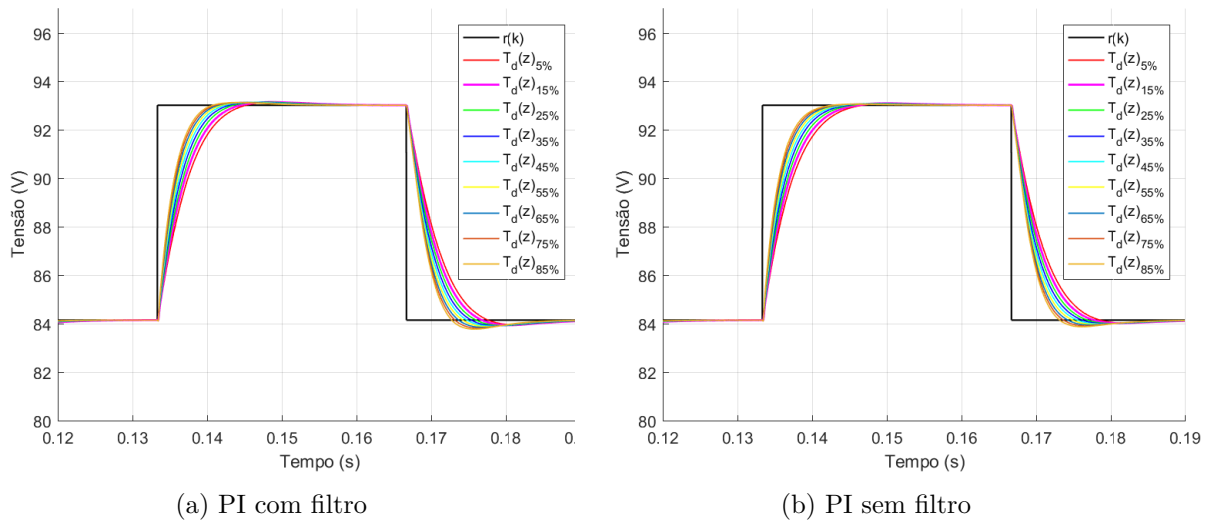
Tabela 15 – Análise da atuação do filtro para PI gerado por $T_d(z)$ de segunda ordem.

$T_d(z)$	<i>Com filtro</i>				<i>Sem Filtro</i>			
	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$	<i>Controlador VRFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	$J^{VR}(\rho)$
$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	$\frac{0.006926(z-0.9938)}{(z-1)}$	10.3	1.49	0.0048	$\frac{0.007300(z-0.9943)}{(z-1)}$	11.1	-	0.1644
$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	$\frac{0.007711(z-0.9939)}{(z-1)}$	9.5	1.45	0.0051	$\frac{0.008129(z-0.9944)}{(z-1)}$	10.4	-	0.1648
$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	$\frac{0.008498(z-0.9940)}{(z-1)}$	8.8	1.47	0.0055	$\frac{0.008958(z-0.9945)}{(z-1)}$	9.7	-	0.1652
$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	$\frac{0.009285(z-0.9940)}{(z-1)}$	8.2	1.43	0.0058	$\frac{0.009787(z-0.9945)}{(z-1)}$	9.1	-	0.1655
$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	$\frac{0.010073(z-0.9941)}{(z-1)}$	7.7	1.40	0.0062	$\frac{0.010615(z-0.9946)}{(z-1)}$	8.6	-	0.1660
$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	$\frac{0.010860(z-0.9941)}{(z-1)}$	7.3	1.37	0.0066	$\frac{0.011442(z-0.9946)}{(z-1)}$	8.1	-	0.1665
$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	$\frac{0.011647(z-0.9942)}{(z-1)}$	6.9	1.35	0.0069	$\frac{0.012269(z-0.9947)}{(z-1)}$	7.8	-	0.1670
$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	$\frac{0.012433(z-0.9942)}{(z-1)}$	6.5	1.32	0.0073	$\frac{0.013095(z-0.9947)}{(z-1)}$	7.3	-	0.1675
$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	$\frac{0.013219(z-0.9942)}{(z-1)}$	6.2	1.27	0.0077	$\frac{0.013920(z-0.9948)}{(z-1)}$	7.0	-	0.1681

Fonte: O autor, 2023.

Figura 18 – Controle projetado a partir de $T_d(z)$ de primeira ordem.

Fonte: O autor, 2023.

Figura 19 – Controle projetado a partir de $T_d(z)$ de segunda ordem.

Fonte: O autor, 2023.

4.3.2 Avaliação de desempenho do seguimento de referência

Os controladores selecionados foram originados da $T_d(z)_{25\%}$ de primeira e segunda ordem e estão situados nas Tabelas 16 e 17 respectivamente. O t_s alcançado com o uso do $T_d(z)$ de primeira ordem foi 30% menor do que em malha aberta e sem *overshoot*. Na Figura 20 expõe-se as respostas do sistema em malha fechada, destacando que o sinal de controle do PID apresenta uma dinâmica mais rápida e que encontra o ponto de saturação inferior durante uma amostra, apesar de ter a mesma dinâmica em relação à referência do sistema controlado pelo PI. O valor desse sinal de controle pode ser reduzido a partir da utilização do polo do controlador derivativo, que foi desconsiderado nas análises.

Tabela 16 – Controle projetado a partir de $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.

Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
PID	$\frac{0.035860(z-0.9953)(z-0.6392)}{z(z-1)}$	9.7	0.0059	-	0.5463	0.1328	2.6492
PI	$\frac{0.013048(z-0.9954)}{(z-1)}$	9.4	0.0053	-	0.5488	0.1335	2.7072

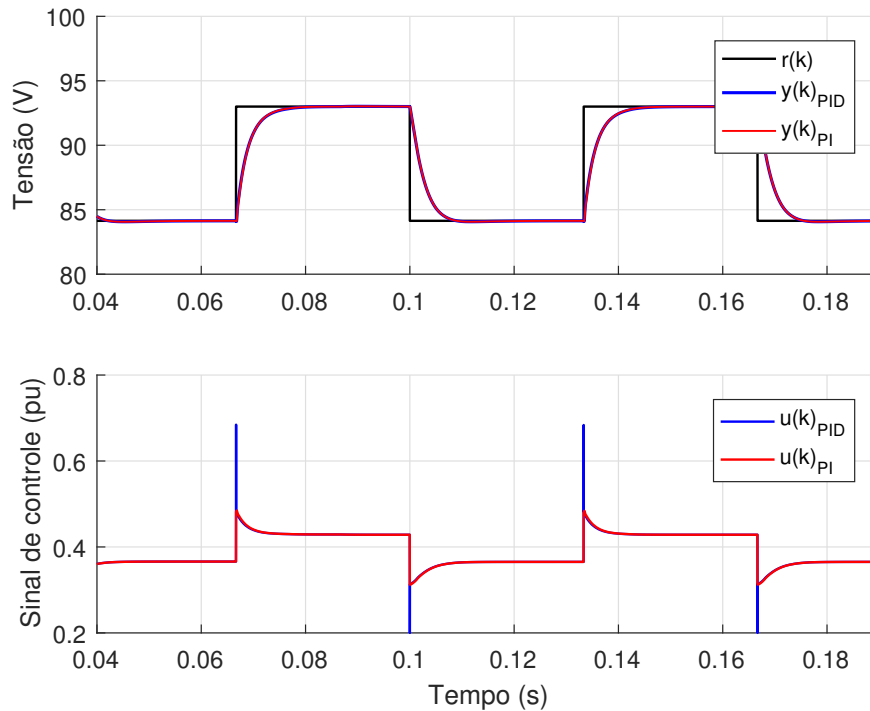
Fonte: O autor, 2023.

Tabela 17 – Controle projetado a partir de $T_d(z)_{45\%}$ de segunda ordem.

Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
PID	$\frac{-0.137938(z-1.0806)(z-0.9948)}{z(z-1)}$	8.0	0.0226	-	0.6610	0.1612	3.2080
PI	$\frac{0.010327(z-0.9942)}{(z-1)}$	7.8	0.0062	1.28	0.6357	0.1551	2.9926

Fonte: O autor, 2023.

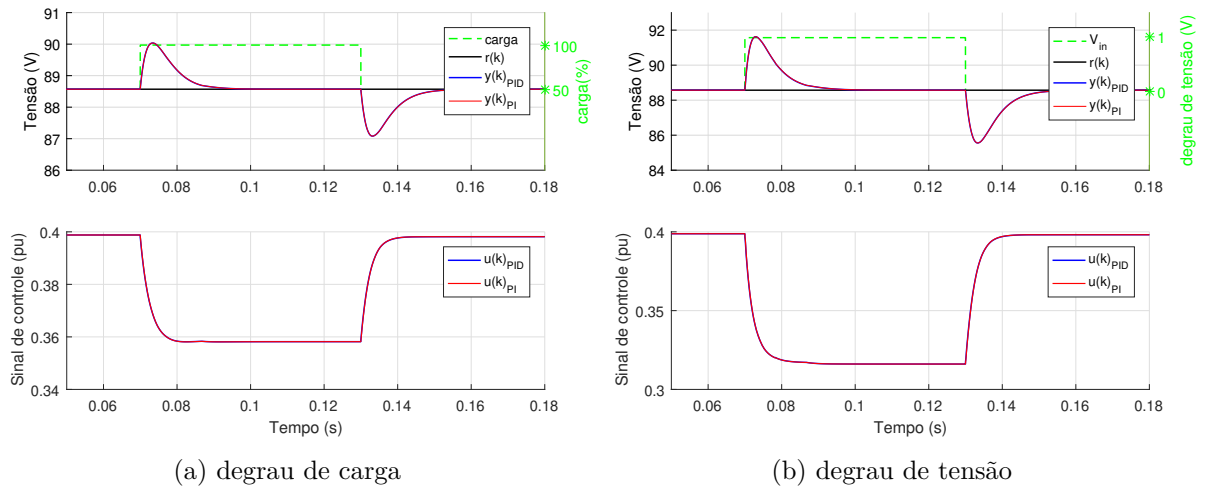
Figura 20 – Resultados de simulação do sistema em malha fechada com controladores projetados por $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.



Fonte: O autor, 2023.

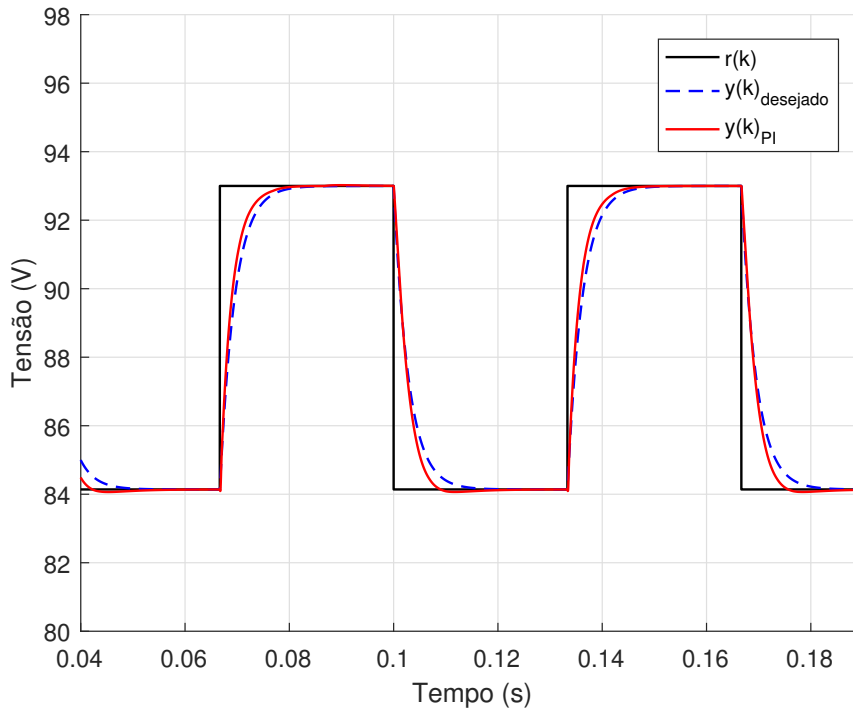
Na Figura 21 demonstra-se o efeito de distúrbios de carga e tensão no sistema. O tempo para rejeição de um degrau de carga é cerca de $23.5ms$ enquanto que para tensão de entrada é de $25.1ms$. Por último, apresenta-se na Figura 22 a comparação entre o comportamento desejado do sistema em malha fechada e o atingido pelo PI projetado.

Figura 21 – Resultados de simulação para distúrbios.



Fonte: O autor, 2023.

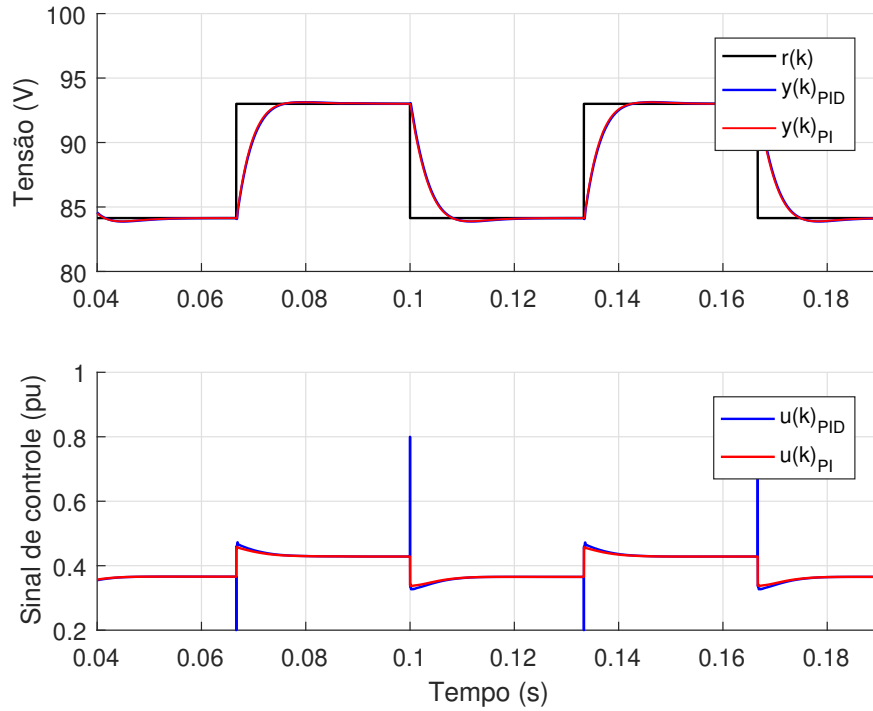
Figura 22 – Comparação entre o desempenho desejado e obtido para a classe PI.



Fonte: O autor, 2023.

Considerando $T_d(z)$ de segunda ordem, os melhores controladores foram identificados a partir da $T_d(z)_{45\%}$. O t_s resultante é 45% menor do que em malha aberta e sem *overshoot*. Neste estudo de caso, o $J^{VR}(\rho)$ de um PI foi em média 4 vezes menor do que o de um PID, ainda que os t_s atingidos tenham sido similares. No entanto, o custo em relação a perturbações e $J_y(\rho)$ permaneceram na mesma faixa de valores para ambas as estruturas. A Figura 23 mostra os resultados do sistema em malha fechada com os controladores projetados. Aqui percebe-se que o sinal de controle de um PID alcança os limites superiores e inferiores da saturação de controle.

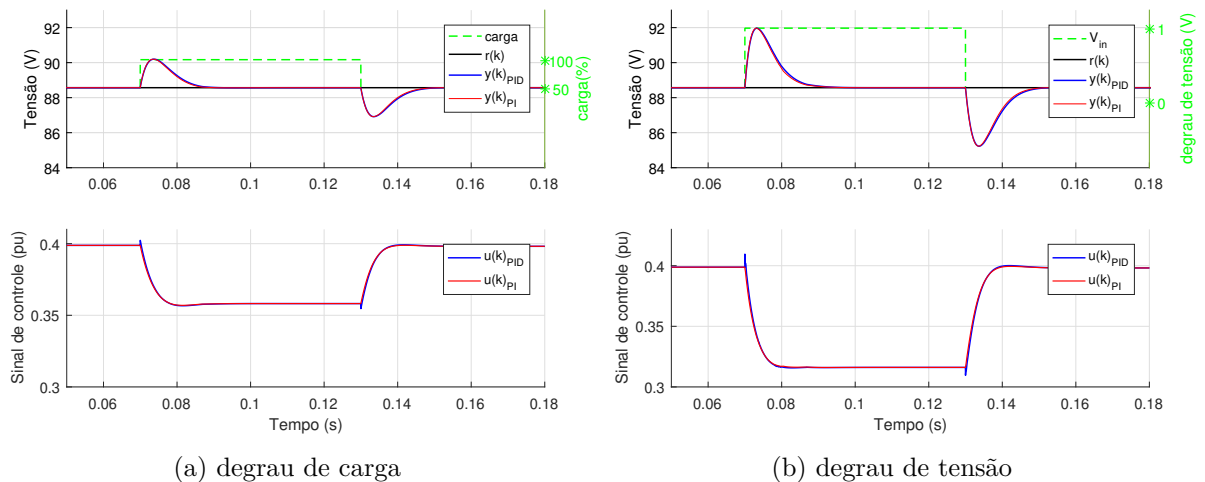
Figura 23 – Resultados de simulação do sistema em malha fechada com controladores projetados por $T_d(z)_{45\%}$ de segunda ordem.



Fonte: O autor, 2023.

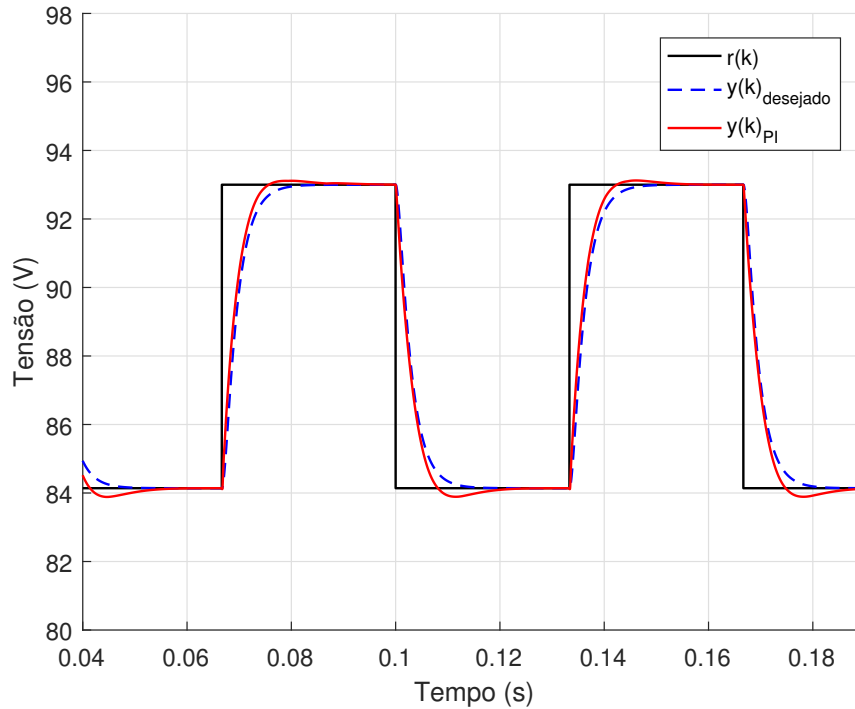
Na Figura 24 demonstra-se o efeito dos perturbações de carga e tensão de entrada no sistema. O tempo para rejeição de um degrau de carga é cerca de $18.0ms$ enquanto que para tensão de entrada é de $21.0ms$. A comparação entre o comportamento desejado e o obtido para o sistema controlado por PI é apresentado na Figura 25.

Figura 24 – Resultados de simulação para distúrbios.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 25 – Comparação entre o desempenho desejado e obtido para a classe PI.



Fonte: O autor, 2023.

4.4 Considerações finais sobre a aplicação do método VRFT

Na avaliação dos controladores projetados obtida a partir de métricas alcançadas pelo sistema em malha fechada, é perceptível que os valores ótimos de cada parâmetro analisado, t_s , $overshoot$, custos em relação a distúrbios, $J^{VR}(\rho)$ e $J_y(\rho)$ não acontecem simultaneamente. O controlador ideal é aquele que assegura o melhor custo-benefício para o seguimento de referência do DSRAC.

De maneira geral, é possível afirmar que o custo $J^{VR}(\rho)$ tem valor mínimo quando a dinâmica do sistema resultante é a mais lenta. Isso decorre de um ideal básico e de fácil compreensão: respostas desejadas próximas ao comportamento do sistema em malha aberta são mais fáceis de serem atingidas.

Atenta-se também ao fato de que a coleta de dados em malha fechada com um controlador proporcional de ganho pequeno impactou significativamente no desempenho do método VRFT. Controladores sintonizados a partir de dados coletados em malha fechada apresentaram respostas com $overshoot$ inferior e melhores tempos de acomodação para seguimento de $T_d(z)$ mais rápidas. Além de atender os requisitos de projeto, a maioria dos ensaios dispõe de custos em relação a distúrbios e $J_y(\rho)$ menores do que a mesma configuração feita a partir do levantamento de dados em malha aberta.

Analisando individualmente os casos com dados coletados em malha aberta e fechada, conclui-se:

- Levantamento de dados em malha aberta: os controladores atenderam integralmente os requisitos de projeto, de maneira geral, por custos em relação a perturbações, $J^{VR}(\rho)$ e $J_y(\rho)$ considerados baixos. Verificou-se que o uso da estrutura PID não apresenta melhoria na resposta do sistema, inclusive piora os índices de custo em relação a distúrbios, $J_y(\rho)$ e t_s . Ou seja, o controle realizado por um PI é suficiente para garantir o seguimento de referência com t_s menor que em malha aberta e *overshoot* nulo.
- Levantamento de dados em malha fechada: os controladores selecionados atingiram resultados satisfatórios. A classe PI foi a estrutura mais eficiente, apresentando um desempenho superior em relação à referência, com melhores valores de t_s , $J^{VR}(\rho)$, $J_y(\rho)$ e custos em relação a perturbações. A estrutura PID não demonstrou vantagens em relação ao PI, inclusive resultando em controladores com ZNM para $T_d(z)$ de segunda ordem.

5 Resultados do método VDFT

Neste capítulo apresentam-se, por sua vez, os resultados para validação do algoritmo do VDFT para o controle do DSRAC. As respostas encontradas são avaliadas através dos mesmos parâmetros considerados para o VRFT, exceto o $J^{VR}(\rho)$ que é substituído pelo $J_y(\rho)$.

5.1 Considerações Iniciais

Como o principal objetivo é aferir o comportamento do sistema em relação à distúrbios de entrada, nesta etapa, o interesse é garantir a minimização de custos em relação a perturbações e simultaneamente certificar-se que o sistema tenha um comportamento adequado em relação à referência.

A coleta de dados para o experimento foi realizada de maneira análoga ao VRFT. Os ensaios foram separados em dois grupos, um com dados coletados em malha aberta e o outro com dados coletados em malha fechada com um controlador proporcional $k_p = 1.58 \times 10^{-3}$. O uso das mesmas condições de simulação entre os métodos favorece a comparação entre as respostas.

O modelo de referência para distúrbios $Q_d(z)$ foi analisado para diferentes atenuações do sinal de distúrbio implementadas a partir de uma redução percentual do seu ganho DC. Verificou-se que reduções deste ganho maiores que 40% resultavam em saturação do sinal de controle. Nos demais casos, foram considerado valores de redução do ganho DC de 10 a 40% com intervalos de 10%.

Primeiramente foi feita uma comparação entre os controladores obtidos via VRFT e VDFT. Para a análise de controle baseado no desempenho da rejeição de distúrbios considerou-se a capacidade de redução do pico da tensão de saída e o tempo necessário para acomodação após um distúrbio.

Utilizando a conclusão obtida no método VRFT de que um atraso na $T_d(z)$ não altera drasticamente o controle obtido, para o VDFT não foi avaliado esse parâmetro. O estudo do controle por VDFT é separado pelo grau relativo da $Q_d(z)$, que muda de acordo com a $T_d(z)$ e a estrutura do controlador definida conforme (23).

- $Q_d(z)$ geradas a partir de $T_d(z)$ de primeira ordem e PID apresentam GR = 1;
- $Q_d(z)$ geradas a partir de $T_d(z)$ de primeira ordem e PI apresentam GR = 1;
- $Q_d(z)$ geradas a partir de $T_d(z)$ de segunda ordem e PID apresentam GR = 2;
- $Q_d(z)$ geradas a partir de $T_d(z)$ de segunda ordem e PI apresentam GR = 2.

5.1.1 Comparação entre VRFT e VDFT com levantamento de dados em malha aberta

A aplicação do método VRFT revelou que um PI é a melhor opção para o controle do sistema, no entanto, no VDFT esta análise deve ser refeita, para isso, utiliza-se dos controladores PI e PID selecionados do VRFT, baseados na $T_d(z)_{25\%}$ de primeira e segunda ordem. Dessa forma, formando $Q_d(z)$ de GR = 1 obtêm-se os controladores via VDFT das Tabelas 18 e 19.

Tabela 18 – Controladores PID projetados via VDFT.

Redução de ganho DC (%)	$Q_d(z)$	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
10	$\frac{0.739068z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	$\frac{-0.017228(z-1.7488)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	7.9	-	22.9	0.5181	20.8	0.1261	2.7584
20	$\frac{0.656949z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	$\frac{0.186726(z-0.9949)(z-0.9228)}{z(z-1)}$	8.5	-	23.6	0.4105	22.4	0.0998	2.3714
30	$\frac{0.574830z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	$\frac{0.448952(z-0.9949)(z-0.9636)}{z(z-1)}$	9.5	-	24.4	0.3150	23.5	0.0765	2.1661
40	$\frac{0.492712z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	$\frac{0.798587(z-0.9949)(z-0.9763)}{z(z-1)}$	10.5	-	24.6	0.2325	24.2	0.0564	2.0194

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 19 – Controladores PI projetados via VDFT.

Redução de ganho DC (%)	$Q_d(z)$	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
10	$\frac{0.620392(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	$\frac{0.012741(z-0.9949)}{(z-1)}$	8.0	-	23.5	0.5169	23.9	0.1010	2.6774
20	$\frac{0.551460(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	$\frac{0.015281(z-0.9953)}{(z-1)}$	7.9	-	24.0	0.4144	22.6	0.1009	2.4563
30	$\frac{0.482527(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	$\frac{0.018547(z-0.9956)}{(z-1)}$	7.8	-	24.8	0.3234	23.9	0.0785	2.2774
40	$\frac{0.413595(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	$\frac{0.022902(z-0.9960)}{(z-1)}$	7.8	-	25.6	0.2419	25.0	0.0586	2.1378

Fonte: O autor, 2023.

No geral, a classe PI apresentou menores valores de t_s em relação à referência, enquanto que o PID teve menores t_s na rejeição de distúrbios. Para ambas as estruturas de controle os custos para rejeição de distúrbios aumentam conforme o ganho DC cresce.

A análise dos controladores projetados por VDFT a partir de $Q_d(z)$ de GR = 2 (Tabelas 20 e 21) demonstra o mesmo comportamento observado para o controle projetado a partir de $Q_d(z)$ de GR = 1.

Tabela 20 – Controladores PID projetados via VDFT.

Redução de ganho DC (%)	$Q_d(z)$	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
10	$\frac{0.031712z(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z+0.3783)(z-0.9724)}$	$\frac{0.106550(z-0.9937)(z-0.9163)}{z(z-1)}$	8.7	-	21.2	0.7189	18.4	0.1755	3.0861
20	$\frac{0.028189z(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)(z+0.3783)}$	$\frac{0.330624(z-0.9935)(z-0.9711)}{z(z-1)}$	9.1	-	22.6	0.5699	20.4	0.1388	2.6471
30	$\frac{0.024665z(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)(z+0.3783)}$	$\frac{0.618720(z-0.9930)(z-0.9837)}{z(z-1)}$	10.1	-	23.4	0.4380	22.4	0.1065	2.3253
40	$\frac{0.021141z(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)(z+0.3783)}$	$\frac{1.002847(z-0.9910)(z-0.9910)}{z(z-1)}$	11.5	-	24.0	0.3232	23.5	0.0785	2.0865

Fonte: O autor, 2023.

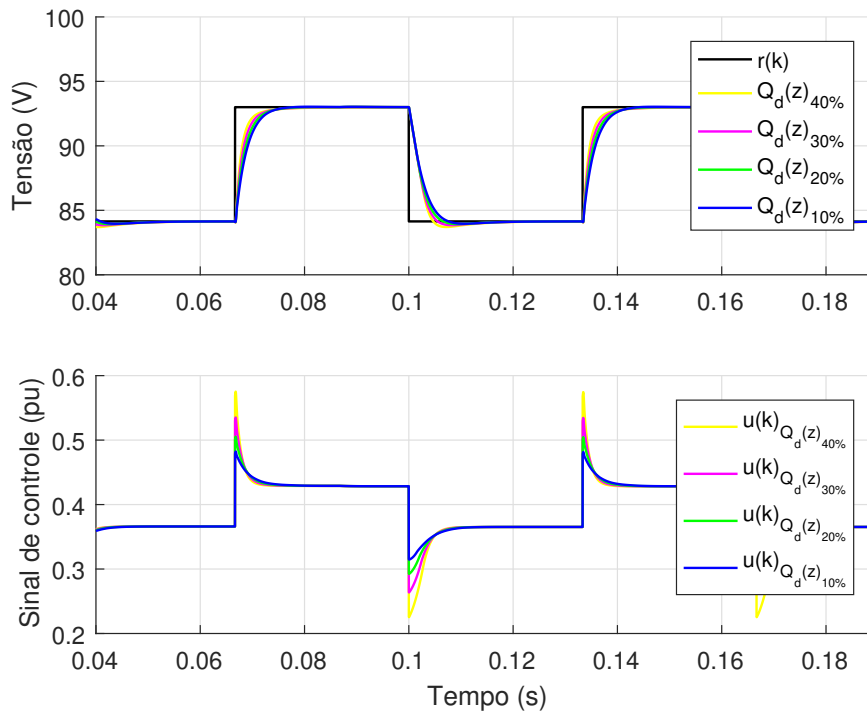
Tabela 21 – Controladores PI projetados via VDFT.

Redução de ganho DC (%)	$Q_d(z)$	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
10	$\frac{0.023064(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	$\frac{0.009527(z-0.9942)}{(z-1)}$	8.4	-	21.3	0.7258	18.6	0.1771	3.2101
20	$\frac{0.020502(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	$\frac{0.011659(z-0.9948)}{(z-1)}$	8.4	-	22.9	0.5861	20.7	0.1427	2.8282
30	$\frac{0.017939(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	$\frac{0.014399(z-0.9953)}{(z-1)}$	8.4	-	24.2	0.4586	22.8	0.1115	2.5364
40	$\frac{0.015376(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	$\frac{0.018054(z-0.9957)}{(z-1)}$	8.4	-	25.3	0.3445	24.4	0.0837	2.3081

Fonte: O autor, 2023.

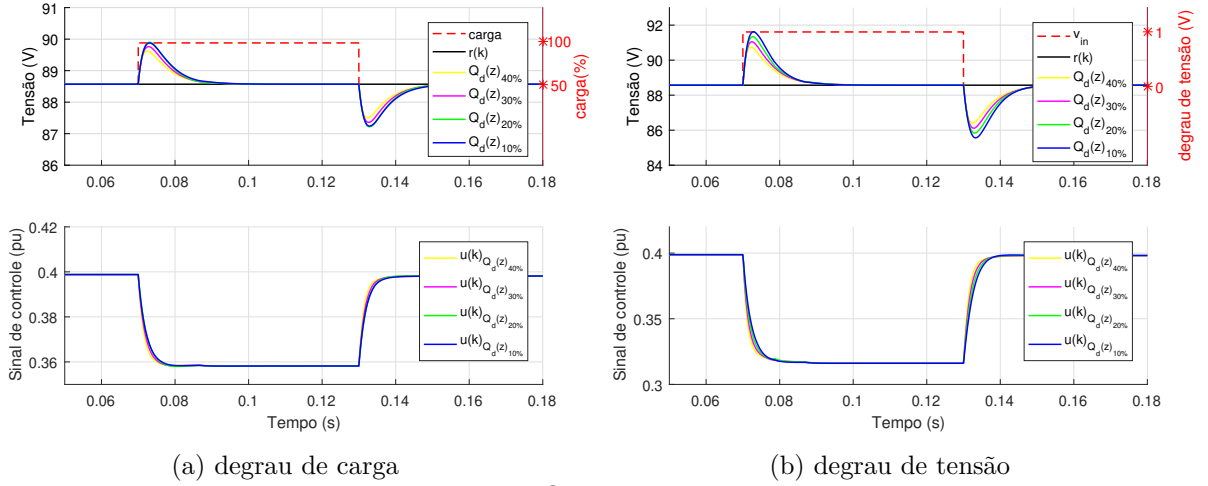
O efeito que o ganho DC de $Q_d(z)$ causa na resposta é exemplificado nas Figuras 26 e 27 por um sistema controlado por PI, a partir dos dados da Tabela 19. O desempenho em relação à referência apresenta um sinal de controle mais agressivo à medida que o ganho DC de $Q_d(z)$ diminui, ao mesmo tempo que, na rejeição de distúrbios, apresenta menores picos na tensão de saída.

Figura 26 – Resultados de simulação do sistema em malha fechada com controladores PI projetados por VDFT.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 27 – Resultados de simulação para distúrbios.



Fonte: O autor, 2023.

Finalmente, com o controle gerado pelos métodos VRFT e VDFT baseados no mesmo modelo de referência fez-se uma comparação entre os seus parâmetros resultantes. Tomou-se como base o modelo $Q_d(z)$ com redução de 40% no ganho DC, sendo este, o ensaio que melhor demonstra o contraste entre os métodos.

Identificou-se que o método VDFT é capaz de minimizar custos de distúrbios mediante a um t_s mais lento do que exibido pelo método VRFT. Apesar disso, analisando, por exemplo, os gráficos das Figuras 13 e 27 comprova-se que o pico de tensão de saída é menor em um sistema com o controle por VDFT.

Em relação ao seguimento de referência, ambos os métodos resultam em *overshoot* irrelevante e t_s menor do que em malha aberta, no entanto, o $J_y(\rho)$ encontrado para o VDFT é inferior e o seu sinal de controle mais agressivo.

Tabela 22 – Resultados de controle baseados na $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.

<i>Estrutura do controlador</i>	<i>PID</i>		<i>PI</i>	
	<i>VRFT</i>	<i>VDFT</i>	<i>VRFT</i>	<i>VDFT</i>
<i>Referência</i>	$t_s = 8.4ms$ $J_y(\rho) = 3.0754$	$t_s = 10.5ms$ $J_y(\rho) = 2.0194$	$t_s = 8.3ms$ $J_y(\rho) = 3.0709$	$t_s = 7.8ms$ $J_y(\rho) = 2.1378$
<i>Degrau de Carga</i>	$t_s = 19.1ms$ $J_{r_o} = 0.1652$	$t_s = 24.2ms$ $J_{r_o} = 0.0564$	$t_s = 19.1ms$ $J_{r_o} = 0.1652$	$t_s = 25.0ms$ $J_{r_o} = 0.0586$
<i>Degrau de Vin</i>	$t_s = 21.8ms$ $J_{v_{in}} = 0.6772$	$t_s = 24.6ms$ $J_{v_{in}} = 0.2325$	$t_s = 21.8ms$ $J_{v_{in}} = 0.6770$	$t_s = 25.6ms$ $J_{v_{in}} = 0.2419$

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 23 – Resultados de controle baseados na $T_d(z)_{25\%}$ de segunda ordem.

<i>Estrutura do controlador</i>	<i>PID</i>		<i>PI</i>	
	<i>VRFT</i>	<i>VDFT</i>	<i>VRFT</i>	<i>VDFT</i>
<i>Característica</i>				
<i>Referência</i>	$t_s = 8.9ms$ $J_y(\rho) = 3.7593$	$t_s = 11.5ms$ $J_y(\rho) = 2.0865$	$t_s = 8.9ms$ $J_y(\rho) = 3.7529$	$t_s = 8.4ms$ $J_y(\rho) = 2.3081$
<i>Degrau de Carga</i>	$t_s = 19.8ms$ $J_{r_o} = 0.2243$	$t_s = 23.5ms$ $J_{r_o} = 0.0785$	$t_s = 19.8ms$ $J_{r_o} = 0.2243$	$t_s = 24.4ms$ $J_{r_o} = 0.0837$
<i>Degrau de Vin</i>	$t_s = 17.8ms$ $J_{v_{in}} = 0.9167$	$t_s = 24.0ms$ $J_{v_{in}} = 0.3232$	$t_s = 17.8ms$ $J_{v_{in}} = 0.9165$	$t_s = 25.3ms$ $J_{v_{in}} = 0.3445$

Fonte: O autor, 2023.

5.1.2 Comparação entre VRFT e VDFT com levantamento de dados malha fechada

Considerando modelos $Q_d(z)$ de GR = 1 obtêm-se os controladores via VDFT demonstrados nas Tabelas 24 e 25, baseados na $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem. Entretanto, para modelos $Q_d(z)$ de GR = 2, não é utilizado o controle PID gerado por VRFT. Isso ocorre porque este controlador apresentou ZNM, o que impossibilitou a formação de modelos $Q_d(z)$ capazes de controlar o sistema de acordo com os requisitos desejados. Dessa forma, é elaborado apenas o controle do tipo PI, baseado na $T_d(z)_{45\%}$ de segunda ordem, conforme apresentado na Tabela 26.

Concluiu-se que o desempenho do controle projetado por dados em malha fechada é o mesmo atingido pela coleta de dados em malha aberta, em resumo:

- O t_s em relação à referência diminui e os custos em relação a distúrbios aumentam conforme o ganho DC de $Q_d(z)$ cresce;
- A classe PI obteve menores t_s em relação à referência, enquanto que a classe PID teve menores t_s na rejeição de distúrbios.

Tabela 24 – Controladores PID projetados via VDFT.

<i>Redução de ganho DC (%)</i>	$Q_d(z)$	<i>Controlador VDFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot (%)</i>	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s <i>Carga (ms)</i>	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
10	$\frac{0.175683z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	$\frac{0.263803(z-0.9952)(z-0.9459)}{z(z-1)}$	10.5	-	25.7	0.4383	24.6	0.1065	2.3821
20	$\frac{0.156163z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	$\frac{0.528823(z-0.9952)(z-0.9697)}{z(z-1)}$	11.5	-	26.3	0.3444	25.6	0.0837	2.1784
30	$\frac{0.136643z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	$\frac{0.869564(z-0.9952)(z-0.9790)}{z(z-1)}$	12.3	-	26.8	0.2627	26.3	0.0638	2.0285
40	$\frac{0.117122z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	$\frac{1.323884(z-0.9952)(z-0.9839)}{z(z-1)}$	12.4	-	27.1	0.1930	26.8	0.0468	1.9710

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 25 – Controladores PI projetados via VDFT.

<i>Redução de ganho DC (%)</i>	$Q_d(z)$	<i>Controlador VDFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot (%)</i>	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s <i>Carga (ms)</i>	J_{ro}	$J_y(\rho)$
10	$\frac{0.482848(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	$\frac{0.015471(z-0.9957)}{(z-1)}$	9.6	-	26.2	0.4468	25.0	0.1087	2.4882
20	$\frac{0.429198(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	$\frac{0.018482(z-0.9960)}{(z-1)}$	9.9	-	27.2	0.3566	26.2	0.0867	2.3108
30	$\frac{0.375548(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	$\frac{0.022354(z-0.9963)}{(z-1)}$	10.2	-	28.1	0.2763	27.4	0.0670	2.1675
40	$\frac{0.321898(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	$\frac{0.027517(z-0.9966)}{(z-1)}$	9.8	-	29.0	0.2055	28.5	0.0497	2.0604

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 26 – Controladores PI projetados via VDFT.

<i>Redução de ganho DC (%)</i>	$Q_d(z)$	<i>Controlador VDFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot (%)</i>	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s <i>Carga (ms)</i>	J_{ro}	$J_y(\rho)$
10	$\frac{0.023047(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	$\frac{0.011876(z-0.9945)}{(z-1)}$	7.4	-	21.2	0.5361	18.4	0.1305	2.7449
20	$\frac{0.020486(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	$\frac{0.014434(z-0.9950)}{(z-1)}$	7.3	-	22.7	0.4286	21.1	0.1043	2.4993
30	$\frac{0.017926(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	$\frac{0.017723(z-0.9954)}{(z-1)}$	7.4	-	23.8	0.3327	22.9	0.0808	2.3049
40	$\frac{0.015365(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	$\frac{0.022108(z-0.9958)}{(z-1)}$	7.2	-	24.9	0.2481	24.3	0.0601	2.1541

Fonte: O autor, 2023.

Nas Tabelas 27 e 28 demonstram-se os parâmetros obtidos a partir do controle VRFT e via VDFT com ganho DC reduzido em 40%, ambos com o uso de dados coletados em malha fechada. A relação entre os fatores resultantes é igual à exposta na seção anterior, ou seja, independe do método de extração dos dados.

Tabela 27 – Resultados de controle baseados na $T_d(z)_{25\%}$ de primeira ordem.

<i>Estrutura de controle</i>	<i>PID</i>		<i>PI</i>	
	<i>VRFT</i>	<i>VDFT</i>	<i>VRFT</i>	<i>VDFT</i>
<i>Característica</i>				
<i>Referência</i>	$t_s = 9.7ms$ $J_y(\rho) = 2.6492$	$t_s = 12.4ms$ $J_y(\rho) = 1.9710$	$t_s = 9.4ms$ $J_y(\rho) = 2.7072$	$t_s = 9.8ms$ $J_y(\rho) = 2.0604$
<i>Degrau de Carga</i>	$t_s = 23.5ms$ $J_{ro} = 0.1328$	$t_s = 26.8ms$ $J_{ro} = 0.0468$	$t_s = 23.5ms$ $J_{ro} = 0.1335$	$t_s = 28.5ms$ $J_{ro} = 0.0497$
<i>Degrau de Vin</i>	$t_s = 25.1ms$ $J_{vin} = 0.5463$	$t_s = 27.1ms$ $J_{vin} = 0.1930$	$t_s = 21.0ms$ $J_{vin} = 0.5488$	$t_s = 29.0ms$ $J_{vin} = 0.2055$

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 28 – Resultados de controle baseados na $T_d(z)_{45\%}$ de segunda ordem.

<i>Estrutura do controlador</i>	<i>PI</i>	
	<i>VRFT</i>	<i>VDFT</i>
<i>Característica</i>		
<i>Referência</i>	$t_s = 7.8ms$ $J_y(\rho) = 2.9926$	$t_s = 7.2ms$ $J_y(\rho) = 2.1541$
<i>Degrau de Carga</i>	$t_s = 18.0ms$ $J_{r_o} = 0.1551$	$t_s = 24.3ms$ $J_{r_o} = 0.0601$
<i>Degrau de Vin</i>	$t_s = 21.0ms$ $J_{v_{in}} = 0.6357$	$t_s = 24.9ms$ $J_{v_{in}} = 0.2481$

Fonte: O autor, 2023.

5.2 Considerações sobre a aplicação do método VDFT

O controle via VDFT apresentou parâmetros de resposta coerentes tanto na rejeição de distúrbios quanto no seguimento de referência. A partir da realização e análise dos ensaios fica evidente que a capacidade de rejeitar distúrbios aumenta conforme os modelos de $Q_d(z)$ se tornam mais rápidos e com ganhos DC menores. Desse modo, o controle ideal projetado por VDFT tem um compromisso entre quanto o ganho pode ser atenuado e quão rápido é a dinâmica de $Q_d(z)$ seguida sem que o sistema sature.

Em relação ao uso de dados coletados em malha fechada com $kp = 1.58 \times 10^{-3}$ os controladores resultantes pelo método tiveram respostas com valores de t_s mais lento em relação a referências e distúrbios. Além disso, nota-se a saturação para dinâmicas de modelos mais lentas em comparação com o controlador obtido com dados em malha aberta.

5.3 Mudança no modelo de referência para distúrbios

No método VRFT a escolha da dominância de polos da $T_d(z)$ implica no controle do sistema. Até este ponto do experimento, aplicando o VDFT, o tempo que o sistema leva para rejeitar um distúrbio dependia do polo dominante de $Q_d(z)$, que por sua vez, é vinculado a escolha das $T_d(z)$ do VRFT.

Com o objetivo de aprimorar a resposta do sistema diante de distúrbios, foram realizadas algumas modificações nos modelos $Q_d(z)$. Dado o desafio de implementar funções de transferência que sejam capazes de seguir referências e rejeitar distúrbios de forma adequada, optou-se por adaptar a estrutura da $Q_d(z)$ previamente utilizada.

O procedimento para geração de novos modelos de rejeição de distúrbios foi iniciado a partir das seguintes regras:

- Manter o GR da $Q_d(z)$ original e alterar seus polos para que todos sejam iguais ao de menor valor;
- Realizar experimentos com os ganhos DC já estabelecidos e verificar se é possível diminuir esses valores;
- Realizar experimentos com $Q_d(z)_{alterada}$ para seguimento de referência e rejeição de distúrbios.

Verifica-se que a mudança de $Q_d(z)$ não pôde seguir à risca essas regras, visto que a alteração de todos os polos impossibilita o seguimento de referência, causando a saturação do sistema. Por esse motivo, foram criados preceitos para a modificação do polo dominante de cada tipo de $Q_d(z)$.

- Para $Q_d(z)$ de GR = 1 gerada a partir de PID, retirar o maior polo e transformar o segundo maior em um duplo dominante mantendo o valor original do menor polo;
- Para $Q_d(z)$ de GR = 1 gerada a partir de PI, retirar o maior polo e transformar o segundo maior em um polo duplo dominante;
- Para $Q_d(z)$ de GR = 2 gerada a partir de PID, retirar o maior polo e transformar o segundo maior em um duplo dominante mantendo o valor original dos dois menores polos;
- Para $Q_d(z)$ de GR = 2 gerada a partir de PI, retirar o maior polo e transformar o segundo maior em um duplo dominante mantendo o valor do menor polo.

Experimentos com as modificações propostas na $Q_d(z)$ foram realizados e alguns de seus resultados são expostos nas Tabelas 29 a 32, juntamente com o controle obtido pelo método tradicional do VDFT. Os controladores apresentados detêm o menor pico de tensão de saída na rejeição de distúrbios de cada ensaio. Conforme já estabelecido, o modelo $Q_d(z)$ mais rápido que o sistema de controle consegue seguir sem saturação garante essa característica.

Os dados analisados demonstram que a mudança de polo dominante possibilita que o tempo necessário para seguimento de referência e rejeição a distúrbios, assim como seus custos, sejam reduzidos. No entanto, percebe-se que algumas respostas que se tornam mais rápidas também podem apresentar um *overshoot* indesejado. Os gráficos de comparação entre o VDFT com $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ que exemplificam as mudanças de resposta são vistos nas Figuras 28 a 31 para a classe PI.

Tabela 29 – Comparação entre controle PID gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ a partir de dados extraídos em malha aberta.

Redução de ganho DC (%)	$Q_d(z)$	Controlador VDFT								$Q_d(z)$ alterado Controlador VDFT								
		t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s (ms)	J_{in}	t_s (ms)	J_{in}	$J_d(\rho)$	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s (ms)	J_{in}	Carga (ms)	J_{in}	$J_d(\rho)$			
10	$\frac{1.08894(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9901)(z+0.2677)}$	$\frac{-0.19188(z-1.0883)(z-0.9939)}{z(z-1)}$	11.2	3.72	14.1	0.2870	13.0	0.0698	2.5129	$\frac{1.0889(z-1)}{(z-0.9929)(z+0.2677)}$	$\frac{0.047784(z-0.9921)(z-0.532)}{z(z-1)}$	8.2	4.74	11.0	0.1301	9.9	0.0317	2.2263
20	$\frac{0.85622(z-1)}{(z-0.9939)(z-0.9909)(z+0.2489)}$	$\frac{0.00012(z-0.9943)(z-0.4193)}{z(z-1)}$	5,0	-	19.3	0.2742	15.5	0.0667	2.2464	$\frac{0.85622(z-1)}{(z-0.9939)(z+0.2489)}$	$\frac{0.21135(z-0.9831)(z-0.8942)}{z(z-1)}$	3.1	1.69	13.8	0.1421	12.6	0.0345	2.1346
30	$\frac{0.97092(z-1)}{(z-0.9939)(z-0.9910)(z+0.2349)}$	$\frac{0.39097(z-0.9945)(z-0.9387)}{z(z-1)}$	5,9	-	21.3	0.2364	20.6	0.0574	2.1196	$\frac{0.97092(z-1)}{(z-0.9939)(z+0.2349)}$	$\frac{0.45345(z-0.9933)(z-0.9484)}{z(z-1)}$	3.4	-	16.0	0.1338	15.0	0.0324	2.0691
40	$\frac{0.86212(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9911)(z+0.1933)}$	$\frac{0.78850(z-0.9949)(z-0.9752)}{z(z-1)}$	10.5	-	24.6	0.2325	24.2	0.0564	2.0194	$\frac{0.86212(z-1)}{(z-0.9944)(z+0.1933)}$	$\frac{0.86707(z-0.9945)(z-0.9742)}{z(z-1)}$	8.3	-	22.0	0.1666	22.3	0.0403	1.9922

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 30 – Comparação entre controle PID gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ a partir de dados extraídos em malha fechada.

Redução de ganho DC (%)	$Q_d(z)$	Controlador VDFT								$Q_d(z)$ alterado								
		t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s (ms)	J_{vin}	t_s (ms)	J_{rc}	$J_p(\rho)$	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s (ms)	J_{vin}	t_s (ms)	J_{rc}	$J_p(\rho)$			
10	$\frac{0.17568(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.8392)}$	$\frac{0.26388(z-0.9952)(z-0.9459)}{(z-1)}$	10.5	-	25.7	0.4383	24.6	0.1065	2.3821	$\frac{0.17568(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)}$	$\frac{0.27558(z-0.9946)(z-0.9334)}{(z-1)}$	6.2	-	21.7	0.2439	21.0	0.0592	2.1282
20	$\frac{0.34016(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.8392)}$	$\frac{0.52822(z-0.9952)(z-0.9697)}{(z-1)}$	11.5	-	26.3	0.3444	25.6	0.0837	2.1784	$\frac{0.34016(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)}$	$\frac{0.54221(z-0.9946)(z-0.9622)}{(z-1)}$	7.0	-	22.0	0.1924	21.7	0.0466	2.0371
30	$\frac{0.50994(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.8392)}$	$\frac{0.80956(z-0.9952)(z-0.9790)}{(z-1)}$	12.3	-	26.8	0.2627	26.3	0.0638	2.0285	$\frac{0.50994(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)}$	$\frac{0.88503(z-0.9945)(z-0.9732)}{(z-1)}$	7.8	-	22.3	0.1471	22.2	0.0356	1.9922
40	$\frac{0.67124(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.8392)}$	$\frac{1.32884(z-0.9952)(z-0.9839)}{(z-1)}$	12.4	-	27.1	0.1930	26.8	0.0468	1.9710	$\frac{0.67124(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)}$	$\frac{1.3441(z-0.9945)(z-0.9796)}{(z-1)}$	7.1	8.80	22.4	0.1081	22.4	0.0261	2.0509

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 31 – Comparação entre controle PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ a partir de dados extraídos em malha aberta.

Redução de ganho DC (%)	$Q_d(z)$	Controlador VDFT								$Q_d(z)$ alterado								
		t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s (ms)	J_{vin}	t_s (ms)	J_{rc}	$J_p(\rho)$	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s (ms)	J_{vin}	t_s (ms)	J_{rc}	$J_p(\rho)$			
10	$\frac{0.36020(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9880)}$	$\frac{0.015587(z-0.9933)}{(z-1)}$	10.1	2.93	14.0	0.2823	20.0	0.0430	2.3461	$\frac{0.36020(z-1)}{(z-0.9929)}$	$\frac{0.022371(z-0.9922)}{(z-1)}$	8.3	4.97	11.0	0.1314	9.9	0.0320	2.2468
20	$\frac{0.67120(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9900)}$	$\frac{0.017541(z-0.9943)}{(z-1)}$	5.0	-	19.3	0.2744	15.6	0.0667	2.2735	$\frac{0.6712(z-1)}{(z-0.9935)}$	$\frac{0.023571(z-0.9933)}{(z-1)}$	7.3	2.48	13.9	0.1448	12.7	0.0351	2.1695
30	$\frac{0.90918(z-1)}{(z-0.9938)(z-0.9910)}$	$\frac{0.020394(z-0.9950)}{(z-1)}$	5.3	-	21.6	0.2407	20.8	0.0584	2.1878	$\frac{0.90918(z-1)}{(z-0.9938)}$	$\frac{0.02614(z-0.9944)}{(z-1)}$	3.3	1.13	16.3	0.1376	15.2	0.0333	2.1152
40	$\frac{0.41335(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9900)}$	$\frac{0.022502(z-0.9960)}{(z-1)}$	7.9	-	25.6	0.2419	25.0	0.0586	2.1378	$\frac{0.41335(z-1)}{(z-0.9944)}$	$\frac{0.026459(z-0.9957)}{(z-1)}$	5.4	-	23.3	0.1741	23.0	0.0421	2.0724

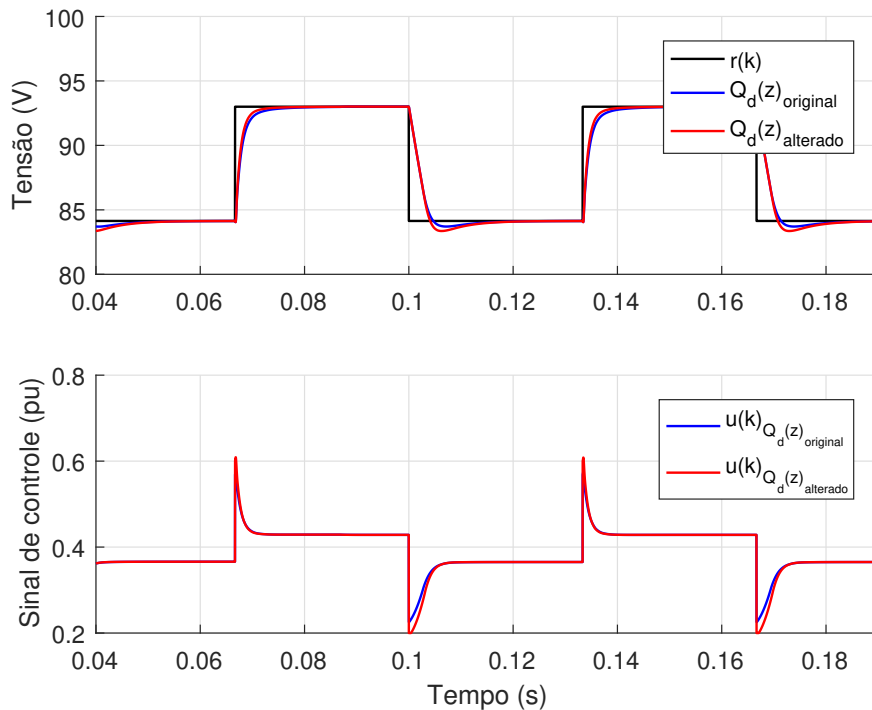
Fonte: O autor, 2023.

Tabela 32 – Comparação entre controle PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ a partir de dados extraídos em malha fechada.

Redução de ganho DC (%)	$Q_d(z)$	Controlador VDFT								$Q_d(z)$ alterado								
		t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s (ms)	J_{vin}	t_s (ms)	J_{rc}	$J_p(\rho)$	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s (ms)	J_{vin}	t_s (ms)	J_{rc}	$J_p(\rho)$			
10	$\frac{0.48284(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	$\frac{0.015471(z-0.9957)}{(z-1)}$	9.6	-	26.2	0.4468	25.0	0.1087	2.4882	$\frac{0.48284(z-1)}{(z-0.9954)}$	$\frac{0.020388(z-0.9951)}{(z-1)}$	5.4	-	21.8	0.2437	21.1	0.0591	2.1883
20	$\frac{0.42919(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	$\frac{0.018482(z-0.9960)}{(z-1)}$	9.9	-	27.2	0.3566	26.2	0.0867	2.3108	$\frac{0.4292(z-1)}{(z-0.9954)}$	$\frac{0.024006(z-0.9954)}{(z-1)}$	5.2	-	22.4	0.1945	22.0	0.0471	2.1098
30	$\frac{0.37460(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	$\frac{0.019744(z-0.9964)}{(z-1)}$	12.0	-	29.8	0.3542	28.9	0.0862	2.2834	$\frac{0.3747(z-1)}{(z-0.9954)}$	$\frac{0.023444(z-0.9961)}{(z-1)}$	4.2	-	26.2	0.2397	25.6	0.0581	2.1282

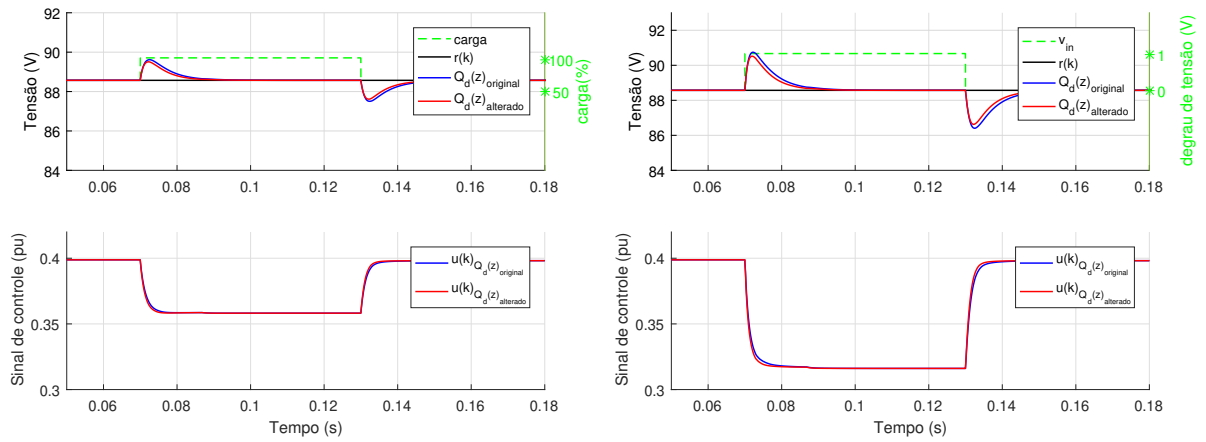
Fonte: O autor, 2023.

Figura 28 – PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ com redução de ganho DC de 40% a partir de dados em malha aberta.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 29 – Resultados de simulação para distúrbios com PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ com redução de ganho DC de 40% a partir de dados em malha aberta.

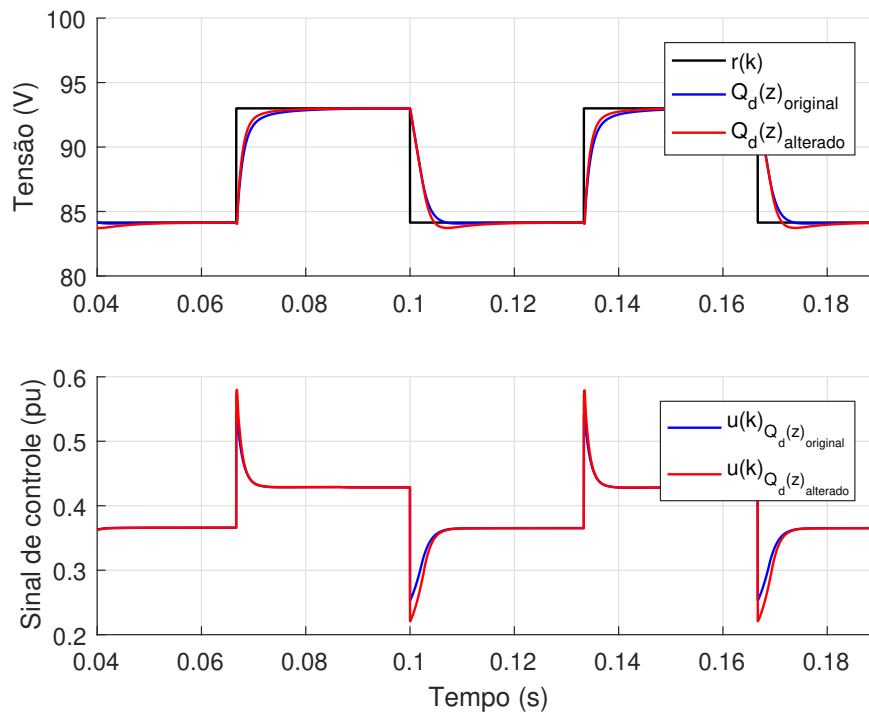


(a) degrau de carga

(b) degrau de tensão

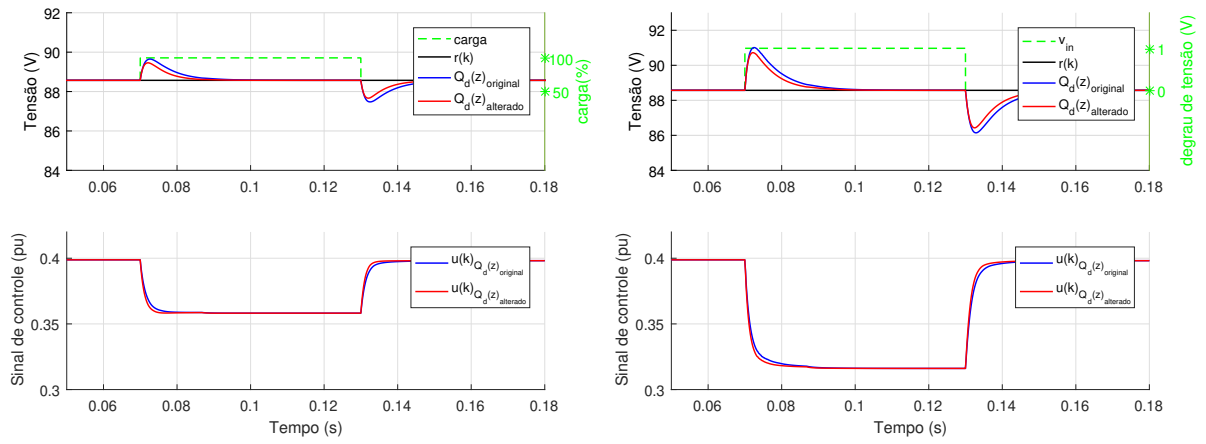
Fonte: O autor, 2023.

Figura 30 – PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ com redução de ganho DC de 30% a partir de dados em malha fechada.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 31 – Resultados de simulação para distúrbios 30% PI gerado por $Q_d(z)_{original}$ e $Q_d(z)_{alterado}$ com redução de ganho DC de 30% a partir de dados em malha fechada.



(a) degrau de carga

(b) degrau de tensão

Fonte: O autor, 2023.

6 Conclusões

O presente trabalho teve como principal objetivo o estudo da sintonia de controladores para um DSRAC. A abordagem de controle demonstrada, o *data-driven*, não exige conhecimento prévio da equação matemática que descreve a planta do sistema. Essa característica é atraente para uso em conversores com fatores difíceis de serem modelados como os elementos ressonantes presentes no conversor analisado.

Como objeto de estudo foram selecionados os métodos de controle *Virtual Reference Feedback Tunning* - VRFT que prioriza a performance em relação à referência e o *Virtual Disturbance Feedback Tunning* - VDFT que foca no desempenho da rejeição de distúrbios. Utilizando-se desses métodos, é de interesse que o sistema em malha fechada tenha resposta mais rápida do que em malha aberta, *overshoot* nulo e potencial para rejeitar perturbações de entrada.

Para a realização da coleta de dados e validação dos resultados utilizou-se do *Software* Simulink em conjunto com o PSIM, através da cossimulação possibilitada pelo bloco SimCoupler do MATLAB. Foram realizados ensaios de seguimento de referência e rejeição de distúrbios para comparar o desempenho dos controladores projetados. Atribuiu-se métricas de custo, t_s e *overshoot* como parâmetros de análise de desempenho, tal como a capacidade do sistema em regular a tensão de saída apesar das variações de entrada.

Com base na definição para coleta de dados e alinhamento na escolha do tipo de modelos de referência, foram estabelecidas diferentes configurações de experimentos levando em consideração as particularidades dos dois métodos. Nota-se que no VRFT os ensaios realizados com dados extraídos em malha fechada com $kp = 1.58 \times 10^{-3}$ tiveram menor *overshoot* e t_s em comparação com ensaios que usaram de dados extraídos em malha aberta. Ao mesmo tempo, percebe-se que o aumento do kp na coleta de dados deteriora o desempenho do controle do conversor. Para o VDFT, o uso de dados extraídos em malha fechada com $kp = 1.58 \times 10^{-3}$ aumenta o t_s em relação a referência e aos distúrbios.

Conforme esperado dos resultados, a partir das simulações de ambos os métodos se entende que os parâmetros analisados t_s , *overshoot*, e custos não assumem seus valores ótimos ao mesmo tempo. O controle projetado que apresenta a melhor performance em relação à referência têm maior dificuldade de rejeitar distúrbios e vice-versa. Também através dos experimentos foi possível comprovar a eficiência da filtragem como mecanismo de diminuição de custos.

O controle PID projetado tanto via VRFT quanto VDFT não apresentou vantagens que justifiquem o seu uso, dado que a estrutura de um PI é capaz de realizar adequadamente o controle do sistema. Ainda, em algumas configurações de ensaio o PID resultante

apresenta ZNM, que não condiz com as características do conversor. O método do VDFT conseguiu uma melhora no desempenho da rejeição de distúrbios e garantia do seguimento da referência com erro nulo, logo, assumindo que o ambiente em que o DSRAC é utilizado contém perturbações, o VDFT torna-se a melhor opção para controle do sistema estudado.

Por último, verificou-se a possibilidade de variar aspectos da $Q_d(z)$ com o propósito de constatar alterações na resposta do sistema. Nesse trabalho foi modificada a dominância dos polos e o ganho DC dos modelos. Comparando os resultados obtidos com o VDFT tradicional, nota-se que de maneira geral as respostas foram mais rápidas, com menor pico de tensão de saída a custos inferiores.

Propõe-se para trabalhos futuros diferentes parâmetros de configuração nas simulações como:

- investigação sobre o valor ótimo do controlador inicial na extração de dados;
- agregar o uso de variáveis instrumentais para análise de ruído;
- estrutura de controle no formato de malhas em cascata;
- ensaios em pontos de operação do conversor fora do valor nominal.

Ainda, pode ser feito um paralelo entre o controle projetado a partir de modelos matemáticos e outros métodos DD. Por fim, podem ser testadas as metodologias de *data-driven* para outros tipos de topologias de conversor.

Referências Bibliográficas

- ABEDINI, S.; ZARABADIPOUR, H. Tuning of an optimal pid controller with iterative feedback tuning method for dc motor. In: *The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 611–615.
- BAZANELLA, A. S.; CAMPESTRINI, L.; ECKHARD, D. *Data-driven controller design: the H2 approach*. [S.l.]: Amsterdam: Springer, 2011.
- CAMPESTRINI, L. Contribuições para métodos de controle baseados em dados obtidos em apenas um experimento. *Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)*, 2010.
- CAMPESTRINI, L.; ECKHARD, D.; GEVERS, M.; BAZANELLA, A. S. Virtual reference feedback tuning for non-minimum phase plants. *Automatica*, v. 47, 2011. ISSN 00051098.
- CAMPESTRINI, L.; RODRIGUES, G.; BAZANELLA, A. S. Automating the choice of the reference model for data-based control methods applied to pid controllers. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizonte, MG, 20 a 24 de Setembro de 2014*, 2014.
- 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. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109802000328>>.
- CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Processamento eletrônico da energia solar fotovoltaica em sistemas conectados à rede elétrica. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 21, 2010.
- ECKHARD, D.; CAMPESTRINI, L.; BOEIRA, E. C. Disturbance feedback tuning. *IFAC Journal of Systems and Control, Laxenburg*, v. 3, p., 2018.
- FREEMAN, F. S.; CHECHIK, L.; TODD, I. Beat the machine (learning): Metal additive manufacturing and closed loop control. *Physics Education*, v. 55, 2020. ISSN 13616552.
- HART, D. *Power Electronics*. Tata McGraw-Hill, 2011. ISBN 9780071321204. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=WvI-Vr69_ZEC>.
- HJALMARSSON, H.; GEVERS, M.; GUNNARSSON, S.; LEQUIN, O. Iterative feedback tuning: theory and applications. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 18, n. 4, p. 26–41, 1998.
- HOU, Z. S.; WANG, Z. From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective. *Information Sciences*, Elsevier, v. 235, p. 3–35, 6 2013. ISSN 0020-0255.
- KAMMER, L.; BITMEAD, R.; BARTLETT, P. Direct iterative tuning via spectral analysis. In: *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.98CH36171)*. [S.l.: s.n.], 1998. v. 3, p. 2874–2879 vol.3.

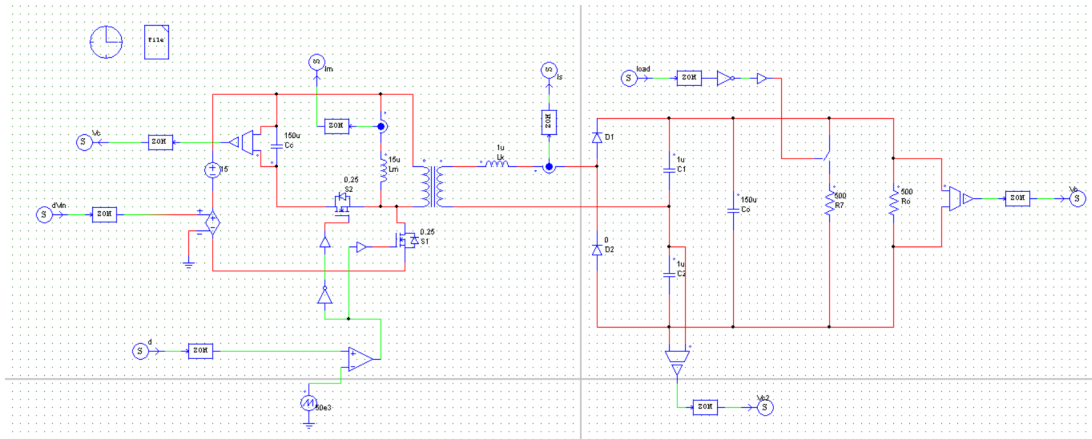
- LEE, J.-J.; KWON, J.-M.; KIM, E.-H.; KWON, B.-H. Dual series-resonant active-clamp converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 2, p. 699–710, 2008.
- LIU, K.-H.; ORUGANTI, R.; LEE, F. C. Y. Quasi-resonant converters-topologies and characteristics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, PE-2, n. 1, p. 62–71, 1987.
- MARTINS, I. B. D. C. *Eletrônica de Potência: conversores CC-CC básicos não isolados*. [S.l.]: Editora dos Autores, 2006.
- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. Pearson Prentice Hall, 2011. ISBN 9788576058106. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=iL3FYgEACAAJ>>.
- OTA, N.; MASUDA, S.; MATSUI, Y. Simultaneous design of reference model and controller for vrft using closed-loop step response data. In: . [S.l.: s.n.], 2019.
- PONTES, A. P.; VIEIRA, H. D. S.; JÚNIOR, E. M. S. Conversor de alto ganho com baixa ondulação de corrente de entrada e de saída para aplicações em sistemas fotovoltaicos. In: *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 76–83.
- RASHID, M. *Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. Makron, 1999. ISBN 9788534605984. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=n9tIAAAACAAJ>>.
- REMES, C. Aplicação de metodologias de controle baseado em dados em conversores cc-cc. *Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)*, 2021.
- SALATI, G. Modelagem dinâmica de um conversor cc-cc duplo-série ressonante com grampemento ativo. *Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)*, 2021.
- SANDERS, S.; NOWOROLSKI, J.; LIU, X.; VERGHESE, G. Generalized averaging method for power conversion circuits. In: *21st Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists*. [S.l.: s.n.], 1990. p. 333–340.
- TURKSOY, O.; YILMAZ, U.; TEKE, A. Efficient ac-dc power factor corrected boost converter design for battery charger in electric vehicles. *Energy*, v. 221, p. 119765, 2021. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221000141>>.
- VASCONCELLOS, G. L. D. Comparação de topologias de conversores cc-cc flyback com grampeamento ativo para aplicações mppt. 2019.
- W.ERICKSON, D. W. R. *Fundamentals of power electronics*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- YU, R. C. S.-Y.; VISWANATHAN, A. Survey of resonant converter topologies. *2018 Texas Instruments Power Supply Design Seminar*, 2018. ISSN SLUP376. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109802000328>>.

ZHENG, Y.; ZHANG, G. Data-driven two degrees of freedom controller design for mimo system via vrft approach. In: *2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 981–986.

APÊNDICE A – Conversor DSRAC

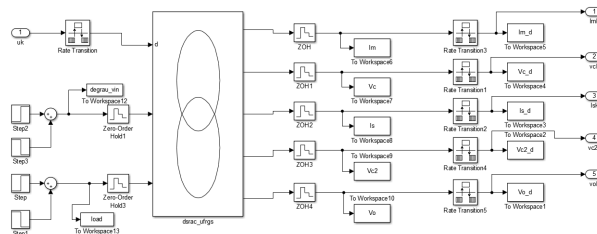
Esse apêndice apresenta o conversor DSRAC projetado nos diferentes ambientes de simulação.

Figura 32 – Esquemático do Conversor DSRAC - PSIM.



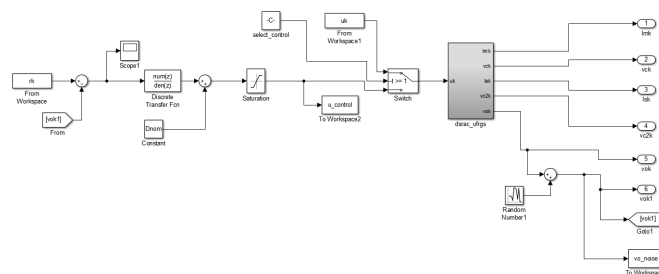
Fonte: (SALATI, 2021).

Figura 33 – Esquemático dos sinais de entrada/saída do DSRAC - Simulink.



Fonte: Adaptado de (SALATI, 2021).

Figura 34 – Esquemático do Ambiente de Simulação - Simulink.



Fonte: Adaptado de (SALATI, 2021).

APÊNDICE B – Controle por VRFT

Aqui são apresentados as configurações/resultados de simulação realizados para sintonia de controladores pelo método VRFT.

B.1 Dados coletados em malha aberta

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Com	PID	$\frac{0.007977(z-0.9946)(z+0.1635)}{z(z-1)}$	9.9	0.0033	-	0.8168	0.1992	3.3933
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PID	$\frac{0.008524(z-0.9944)(z+0.1933)}{z(z-1)}$	8.4	0.0033	-	0.6772	0.1652	3.0754
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PID	$\frac{0.008524(z-0.9944)(z+0.1933)}{z(z-1)}$	8.4	0.0033	-	0.6772	0.1652	3.0754
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Com	PID	$\frac{0.009307(z-0.9939)(z+0.2349)}{z(z-1)}$	6.5	0.0031	1.80	0.5102	0.1242	2.7377
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Com	PID	$\frac{0.009574(z-0.9936)(z+0.2489)}{z(z-1)}$	11.7	0.0030	2.37	0.4576	0.1113	2.6466
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Com	PID	$\frac{0.009918(z-0.9929)(z+0.2677)}{z(z-1)}$	11.8	0.0027	3.50	0.3848	0.0937	2.5425
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Com	PID	$\frac{0.010099(z-0.9915)(z+0.2823)}{z(z-1)}$	11.4	0.0021	6.32	0.3078	0.0752	2.4857
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Com	PID	$\frac{0.009748(z-0.9893)(z+0.2778)}{z(z-1)}$	10.5	0.0014	10.27	0.2603	0.0637	2.5384
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Com	PID	$\frac{0.008250(z-0.9842)(z+0.2409)}{z(z-1)}$	13.8	0.0006	17.83	0.2438	0.0598	2.7837

Tabela 33 – PID com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MA.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Sem	PID	$\frac{0.010937(z-0.9952)(z+0.0310)}{z(z-1)}$	10.1	0.1707	-	0.6735	0.1641	2.9828
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{0.012114(z-0.9951)(z+0.0690)}{z(z-1)}$	8.7	0.1717	-	0.5308	0.1291	2.6889
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{0.012114(z-0.9951)(z+0.0690)}{z(z-1)}$	8.7	0.1717	-	0.5308	0.1291	2.6889
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Sem	PID	$\frac{0.014247(z-0.9950)(z+0.1329)}{z(z-1)}$	6.6	0.1737	-	0.3572	0.0869	2.3758
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Sem	PID	$\frac{0.015223(z-0.9949)(z+0.1602)}{z(z-1)}$	5.9	0.1747	-	0.3023	0.0735	2.2895
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Sem	PID	$\frac{0.017027(z-0.9948)(z+0.2076)}{z(z-1)}$	4.7	0.1767	-	0.2264	0.0550	2.1898
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Sem	PID	$\frac{0.020175(z-0.9945)(z+0.2818)}{z(z-1)}$	3.4	0.1805	-	0.1433	0.0347	2.1216
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Sem	PID	$\frac{0.024071(z-0.9940)(z+0.3603)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Sem	PID	$\frac{0.031168(z-0.9928)(z+0.4740)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 34 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MA.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Com	PI	$\frac{0.009269(z-0.9946)}{(z-1)}$	9.9	0.0033	-	0.8167	0.1992	3.3896
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.010155(z-0.9944)}{(z-1)}$	8.3	0.0033	-	0.6770	0.1652	3.0709
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.010155(z-0.9944)}{(z-1)}$	8.3	0.0033	-	0.6770	0.1652	3.0709
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Com	PI	$\frac{0.011463(z-0.9938)}{(z-1)}$	6.5	0.0031	1.80	0.5101	0.1243	2.7330
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Com	PI	$\frac{0.011919(z-0.9935)}{(z-1)}$	11.8	0.0030	2.37	0.4576	0.1114	2.6414
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Com	PI	$\frac{0.012521(z-0.9929)}{(z-1)}$	11.8	0.0027	3.62	0.3850	0.0937	2.5373
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Com	PI	$\frac{0.012869(z-0.9915)}{(z-1)}$	11.4	0.0021	6.32	0.3082	0.0752	2.4801
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Com	PI	$\frac{0.012342(z-0.9892)}{(z-1)}$	10.5	0.0014	10.49	0.2609	0.0638	2.5357
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Com	PI	$\frac{0.010086(z-0.9839)}{(z-1)}$	13.9	0.0006	18.17	0.2443	0.0599	2.7881

Tabela 35 – PI com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MA.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Sem	PI	$\frac{0.011274(z-0.9952)}{(z-1)}$	10.2	0.1708	-	0.6735	0.1641	2.9820
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.012945(z-0.9951)}{(z-1)}$	8.7	0.1718	-	0.5308	0.1291	2.6867
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.012945(z-0.9951)}{(z-1)}$	8.7	0.1718	-	0.5308	0.1291	2.6867
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Sem	PI	$\frac{0.016128(z-0.9950)}{(z-1)}$	8.7	0.1738	-	0.3573	0.0869	2.3712
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Sem	PI	$\frac{0.017643(z-0.9949)}{(z-1)}$	5.9	0.1748	-	0.3024	0.0735	2.2841
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Sem	PI	$\frac{0.020533(z-0.9948)}{(z-1)}$	4.8	0.1768	-	0.2265	0.0550	2.1832
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Sem	PI	$\frac{0.025801(z-0.9945)}{(z-1)}$	3.4	0.1807	-	0.1434	0.0348	2.1129
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Sem	PI	$\frac{0.032627(z-0.9940)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Sem	PI	$\frac{0.045592(z-0.9928)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 36 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MA.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{0.004526(z-0.9936)(z+0.4314)}{z(z-1)}$	10.5	0.0042	1.72	1.1738	0.2875	4.3670
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PID	$\frac{0.005010(z-0.9935)(z+0.4011)}{z(z-1)}$	9.6	0.0043	1.84	1.0389	0.2545	4.0616
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{0.005455(z-0.9935)(z+0.3783)}{z(z-1)}$	8.9	0.0044	1.98	0.9313	0.2279	3.8039
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{0.005865(z-0.9934)(z+0.3608)}{z(z-1)}$	14.7	0.0044	2.22	0.8444	0.2063	3.6008
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PID	$\frac{0.006240(z-0.9934)(z+0.3471)}{z(z-1)}$	14.6	0.0044	2.40	0.7716	0.1884	3.4296
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{0.006583(z-0.9933)(z+0.3361)}{z(z-1)}$	14.4	0.0044	2.60	0.7105	0.1735	3.2824
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{0.006895(z-0.9932)(z+0.3271)}{z(z-1)}$	14.3	0.0044	2.86	0.6590	0.1608	3.1559
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{0.007179(z-0.9931)(z+0.3196)}{z(z-1)}$	14.2	0.0044	3.16	0.6149	0.1500	3.0535
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{0.007436(z-0.9930)(z+0.3132)}{z(z-1)}$	13.9	0.0044	3.41	0.5769	0.1408	2.9637

Tabela 37 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MA.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PID	$\frac{0.005706(z-0.9943)(z+0.3157)}{z(z-1)}$	10.9	0.1813	-	1.0609	0.2594	4.0199
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Sem	PID	$\frac{0.006359(z-0.9943)(z+0.3039)}{z(z-1)}$	10.0	0.1812	-	0.9222	0.2254	3.6821
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PID	$\frac{0.006999(z-0.9944)(z+0.2948)}{z(z-1)}$	9.4	0.1811	-	0.8111	0.1979	3.4116
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{0.007623(z-0.9944)(z+0.2881)}{z(z-1)}$	8.7	0.1811	-	0.7191	0.1754	3.1775
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Sem	PID	$\frac{0.008230(z-0.9944)(z+0.2835)}{z(z-1)}$	8.2	0.1811	-	0.6430	0.1568	2.9941
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PID	$\frac{0.008820(z-0.9944)(z+0.2805)}{z(z-1)}$	7.7	0.1811	-	0.5790	0.1411	2.8464
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PID	$\frac{0.009394(z-0.9944)(z+0.2789)}{z(z-1)}$	7.3	0.1812	-	0.5251	0.1278	2.7299
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PID	$\frac{0.009950(z-0.9944)(z+0.2784)}{z(z-1)}$	6.9	0.1814	1.00	0.4783	0.1164	2.6358
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PID	$\frac{0.010491(z-0.9944)(z+0.2784)}{z(z-1)}$	6.5	0.1815	1.01	0.4379	0.1066	2.5571

Tabela 38 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MA.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.006463(z-0.9936)}{(z-1)}$	10.5	0.0042	1.73	1.1734	0.2874	4.3594
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PI	$\frac{0.007002(z-0.9935)}{(z-1)}$	9.6	0.0043	1.86	1.0388	0.2544	4.0546
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.007501(z-0.9935)}{(z-1)}$	8.9	0.0044	2.00	0.9311	0.2279	3.7968
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.007961(z-0.9934)}{(z-1)}$	15.0	0.0044	2.23	0.8442	0.2062	3.5946
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PI	$\frac{0.008385(z-0.9933)}{(z-1)}$	15.8	0.0044	2.43	0.7714	0.1884	3.4232
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.008773(z-0.9932)}{(z-1)}$	14.6	0.0044	2.64	0.7106	0.1734	3.2768
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.009126(z-0.9931)}{(z-1)}$	14.4	0.0044	2.87	0.6588	0.1608	3.1505
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.009448(z-0.9930)}{(z-1)}$	14.0	0.0044	3.18	0.6147	0.1500	3.0473
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.009739(z-0.9929)}{(z-1)}$	13.9	0.0044	3.44	0.5766	0.1407	2.9574

Tabela 39 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MA.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PI	$\frac{0.007496(z-0.9943)}{(z-1)}$	10.9	0.1814	-	1.0605	0.2594	4.0138
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Sem	PI	$\frac{0.008279(z-0.9943)}{(z-1)}$	10.1	0.1813	-	0.9221	0.2254	3.6760
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PI	$\frac{0.009048(z-0.9944)}{(z-1)}$	9.3	0.1812	-	0.8111	0.1979	3.4056
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.009805(z-0.9944)}{(z-1)}$	8.8	0.1812	-	0.7191	0.1754	3.1708
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Sem	PI	$\frac{0.010548(z-0.9944)}{(z-1)}$	8.2	0.1812	-	0.6430	0.1568	2.9872
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PI	$\frac{0.011278(z-0.9944)}{(z-1)}$	7.7	0.1812	-	0.5790	0.1411	2.8394
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PI	$\frac{0.011996(z-0.9944)}{(z-1)}$	7.5	0.1814	-	0.5251	0.1278	2.7232
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PI	$\frac{0.012701(z-0.9944)}{(z-1)}$	6.9	0.1815	1.02	0.4784	0.1164	2.6285
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PI	$\frac{0.013394(z-0.9944)}{(z-1)}$	6.5	0.1817	1.02	0.4379	0.1066	2.5490

Tabela 40 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MA.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z}{(z-0.9941)(z+0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{0.0046335(z-0.9936)(z+0.4100)}{z(z-1)}$	10.5	0.0042	-	1.1655	0.2855	4.3450
15	$\frac{0.00016293z}{(z-0.9936)(z+0.9746)}$	13.1	Com	PID	$\frac{0.005121(z-0.9936)(z+0.3821)}{z(z-1)}$	9.5	0.0043	-	1.0316	0.2526	4.0398
25	$\frac{0.00019222z}{(z-0.9930)(z+0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{0.005571(z-0.9935)(z+0.3612)}{z(z-1)}$	8.9	0.0044	-	0.9240	0.2261	3.7812
35	$\frac{0.00022390z}{(z-0.9925)(z+0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{0.005983(z-0.9935)(z+0.3454)}{z(z-1)}$	14.9	0.0044	-	0.8374	0.2046	3.5806
45	$\frac{0.00025794z}{(z-0.9919)(z+0.9681)}$	10.4	Com	PID	$\frac{0.0063608(z-0.9934)(z+0.3330)}{z(z-1)}$	14.8	0.0044	-	0.7650	0.1868	3.4091
55	$\frac{0.00029433z}{(z-0.9914)(z+0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{0.0067051(z-0.9933)(z+0.3232)}{z(z-1)}$	14.5	0.0044	-	0.7040	0.1719	3.2634
65	$\frac{0.00033307z}{(z-0.9908)(z+0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{0.0070185(z-0.9932)(z+0.3153)}{z(z-1)}$	14.2	0.0044	-	0.6529	0.1593	3.1376
75	$\frac{0.00037415z}{(z-0.9903)(z+0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{0.0073032(z-0.9931)(z+0.3087)}{z(z-1)}$	14.0	0.0044	-	0.6091	0.1486	3.0346
85	$\frac{0.00041755z}{(z-0.9897)(z+0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{0.0075613(z-0.9930)(z+0.3031)}{z(z-1)}$	13.9	0.0044	-	0.5713	0.1394	2.9460

Tabela 41 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.006518(z-0.9936)}{z(z-1)}$	10.4	0.0042	1.40	1.1652	0.2854	4.3377
15	$\frac{0.00016293z}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PI	$\frac{0.007061(z-0.9936)}{z(z-1)}$	9.6	0.0043	1.35	1.0311	0.2525	4.0323
25	$\frac{0.00019222z}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.007565(z-0.9935)}{z(z-1)}$	8.9	0.0043	1.35	0.9238	0.2261	3.7747
35	$\frac{0.00022390z}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.008031(z-0.9934)}{z(z-1)}$	14.8	0.0044	1.31	0.8372	0.2045	3.5745
45	$\frac{0.00025794z}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PI	$\frac{0.008458(z-0.9934)}{z(z-1)}$	14.8	0.0044	1.28	0.7648	0.1867	3.4030
55	$\frac{0.00029433z}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.008850(z-0.9933)}{z(z-1)}$	14.2	0.0044	1.24	0.7041	0.1719	3.2573
65	$\frac{0.00033307z}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.009208(z-0.9932)}{z(z-1)}$	14.3	0.0044	1.21	0.6528	0.1593	3.1313
75	$\frac{0.00037415z}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.009533(z-0.9931)}{z(z-1)}$	14.0	0.0043	1.17	0.6088	0.1486	3.0291
85	$\frac{0.00041755z}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.009826(z-0.9930)}{z(z-1)}$	13.8	0.0043	1.14	0.5711	0.1393	2.9401

Tabela 42 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z^2}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{0.004742(z-0.9936)(z+0.3891)}{z(z-1)}$	10.4	0.0042	-	1.1574	0.2835	4.3231
15	$\frac{0.00016293z^2}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.0	Com	PID	$\frac{0.005235(z-0.9936)(z+0.3634)}{z(z-1)}$	9.6	0.0042	-	1.0239	0.2506	4.0167
25	$\frac{0.00019222z^2}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{0.005688(z-0.9936)(z+0.3444)}{z(z-1)}$	8.9	0.0043	-	0.9167	0.2243	3.7593
35	$\frac{0.00022390z^2}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{0.006105(z-0.9935)(z+0.3300)}{z(z-1)}$	14.1	0.0043	-	0.8312	0.2029	3.5607
45	$\frac{0.00025794z^2}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.3	Com	PID	$\frac{0.006485(z-0.9934)(z+0.3189)}{z(z-1)}$	14.5	0.0043	-	0.7586	0.1852	3.3889
55	$\frac{0.00029433z^2}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{0.006832(z-0.9933)(z+0.3102)}{z(z-1)}$	14.4	0.0043	-	0.6978	0.1703	3.2436
65	$\frac{0.00033307z^2}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{0.007147(z-0.9932)(z+0.3031)}{z(z-1)}$	14.2	0.0043	-	0.6466	0.1578	3.1180
75	$\frac{0.00037415z^2}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{0.007433(z-0.9931)(z+0.2973)}{z(z-1)}$	14.0	0.0043	-	0.6032	0.1472	3.0162
85	$\frac{0.00041755z^2}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{0.007692(z-0.9930)(z+0.2925)}{z(z-1)}$	13.8	0.0042	-	0.5657	0.1380	2.9287

Tabela 43 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MA.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z^2}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.006572(z-0.9936)}{(z-1)}$	10.4	0.0042	1.40	1.1571	0.2834	4.3154
15	$\frac{0.00016293z^2}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.0	Com	PI	$\frac{0.007121(z-0.9936)}{(z-1)}$	9.6	0.0042	1.35	1.0235	0.2506	4.0102
25	$\frac{0.00019222z^2}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.007630(z-0.9935)}{(z-1)}$	8.9	0.0043	1.35	0.9165	0.2243	3.7529
35	$\frac{0.00022390z^2}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.008100(z-0.9935)}{(z-1)}$	14.3	0.0043	1.31	0.8309	0.2028	3.5543
45	$\frac{0.00025794z^2}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.3	Com	PI	$\frac{0.008533(z-0.9934)}{(z-1)}$	14.6	0.0043	1.28	0.7584	0.1851	3.3831
55	$\frac{0.00029433z^2}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.008929(z-0.9933)}{(z-1)}$	14.2	0.0043	1.24	0.6976	0.1703	3.2370
65	$\frac{0.00033307z^2}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.009290(z-0.9932)}{(z-1)}$	14.1	0.0043	1.21	0.6464	0.1578	3.1125
75	$\frac{0.00037415z^2}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.009618(z-0.9931)}{(z-1)}$	14.0	0.0043	1.17	0.6030	0.1471	3.0106
85	$\frac{0.00041755z^2}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.009915(z-0.9930)}{(z-1)}$	13.7	0.0042	1.14	0.5656	0.1380	2.9228

Tabela 44 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MA.

B.2 Dados coletados em malha fechada

- $kp = 1.58 \times 10^{-3}$

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Com	PID	$\frac{0.030342(z-0.9953)(z-0.6335)}{z(z-1)}$	11.1	0.0052	-	0.6996	0.1705	2.9744
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PID	$\frac{0.035860(z-0.9953)(z-0.6392)}{z(z-1)}$	9.7	0.0059	-	0.5463	0.1328	2.6492
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PID	$\frac{0.035860(z-0.9953)(z-0.6392)}{z(z-1)}$	9.7	0.0059	-	0.5463	0.1328	2.6492
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Com	PID	$\frac{0.047539(z-0.9953)(z-0.6517)}{z(z-1)}$	7.7	0.0077	-	0.3598	0.0874	2.3162
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Com	PID	$\frac{0.053633(z-0.9953)(z-0.6576)}{z(z-1)}$	7.0	0.0087	-	0.3009	0.0731	2.2268
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Com	PID	$\frac{0.066152(z-0.9953)(z-0.6682)}{z(z-1)}$	5.7	0.0108	-	0.2200	0.0533	2.1204
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Com	PID	$\frac{0.091763(z-0.9953)(z-0.6336)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Com	PID	$\frac{0.129638(z-0.9953)(z-0.6953)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Com	PID	$\frac{0.214533(z-0.9953)(z-0.6978)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 45 – PID com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Sem	PID	$\frac{0.037814(z-0.9954)(z-0.7020)}{z(z-1)}$	11.3	0.1537	-	0.6897	0.1680	2.9345
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{0.042778(z-0.9954)(z-0.6929)}{z(z-1)}$	9.9	0.1560	-	0.5375	0.1307	2.6271
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{0.042778(z-0.9954)(z-0.6929)}{z(z-1)}$	9.9	0.1560	-	0.5375	0.1307	2.6271
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Sem	PID	$\frac{0.053068(z-0.9953)(z-0.6821)}{z(z-1)}$	7.8	0.1607	-	0.3536	0.0859	2.3021
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Sem	PID	$\frac{0.058376(z-0.9953)(z-0.6792)}{z(z-1)}$	7.0	0.1630	-	0.2956	0.0717	2.2138
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Sem	PID	$\frac{0.069278(z-0.9954)(z-0.6792)}{z(z-1)}$	5.8	0.1679	-	0.2158	0.0523	2.1107
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Sem	PID	$\frac{0.091968(z-0.9954)(z-0.6752)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Sem	PID	$\frac{0.127296(z-0.9954)(z-0.6782)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Sem	PID	$\frac{0.216397(z-0.9953)(z-0.6829)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 46 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Com	PI	$\frac{0.011213(z-0.9954)}{(z-1)}$	10.8	0.0047	-	0.7031	0.1712	3.0312
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.013048(z-0.9954)}{(z-1)}$	9.4	0.0053	-	0.5488	0.1335	2.7072
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.013048(z-0.9954)}{(z-1)}$	9.4	0.0053	-	0.5488	0.1335	2.7072
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Com	PI	$\frac{0.016708(z-0.9954)}{(z-1)}$	7.5	0.0066	-	0.3626	0.0880	2.3590
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Com	PI	$\frac{0.018532(z-0.9953)}{(z-1)}$	6.8	0.0072	-	0.3034	0.0737	2.2622
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Com	PI	$\frac{0.022163(z-0.9953)}{(z-1)}$	5.6	0.0085	-	0.2225	0.0539	2.1454
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Com	PI	$\frac{0.029353(z-0.9953)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Com	PI	$\frac{0.039973(z-0.9953)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Com	PI	$\frac{0.065742(z-0.9953)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 47 – PI com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Sem	PI	$\frac{0.011395(z-0.9954)}{(z-1)}$	10.8	0.1517	-	0.6910	0.1683	3.0012
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.013278(z-0.9954)}{(z-1)}$	9.5	0.1538	-	0.5386	0.1309	2.6827
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.013278(z-0.9954)}{(z-1)}$	9.5	0.1538	-	0.5386	0.1309	2.6827
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Sem	PI	$\frac{0.017039(z-0.9954)}{(z-1)}$	7.5	0.1579	-	0.3543	0.0860	2.3426
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Sem	PI	$\frac{0.018918(z-0.9954)}{(z-1)}$	6.9	0.1600	-	0.2962	0.0719	2.2471
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Sem	PI	$\frac{0.022671(z-0.9954)}{(z-1)}$	5.6	0.1640	-	0.2162	0.0524	2.1348
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Sem	PI	$\frac{0.030166(z-0.9954)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Sem	PI	$\frac{0.041384(z-0.9954)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Sem	PI	$\frac{0.069341(z-0.9954)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 48 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{-0.143816(z-1.0538)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	10.6	0.0221	-	1.1423	0.2796	4.4204
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PID	$\frac{-0.146651(z-1.0582)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	9.8	0.0233	-	0.9889	0.2419	4.0468
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{-0.148667(z-1.0628)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	9.1	0.0242	-	0.8656	0.2113	3.7486
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{-0.150024(z-1.0675)(z-0.9948)}{z(z-1)}$	8.5	0.0250	-	0.7637	0.1864	3.4828
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PID	$\frac{-0.150843(z-1.0724)(z-0.9948)}{z(z-1)}$	8.0	0.0257	-	0.6789	0.1656	3.2666
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{-0.151213(z-1.0538)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	7.5	0.0263	-	0.6075	0.1481	3.0811
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{-0.151205(z-1.0538)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	7.2	0.0268	-	0.5477	0.1334	2.9442
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{-0.150874(z-1.0538)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	6.8	0.0272	-	0.4958	0.1207	2.8301
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{-0.150265(z-1.0538)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	6.5	0.0275	-	0.4509	0.1098	2.7335

Tabela 49 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PID	$\frac{-0.143871(z-1.0562)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	11.0	0.1725	-	1.1184	0.2736	4.3250
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Sem	PID	$\frac{-0.148109(z-1.0603)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	10.2	0.1743	-	0.9682	0.2365	3.9551
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PID	$\frac{-0.151427(z-1.0646)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	9.5	0.1759	-	0.8472	0.2067	3.6628
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{-0.153998(z-1.0690)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	8.9	0.1774	-	0.7470	0.1822	3.4029
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Sem	PID	$\frac{-0.155955(z-1.0735)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	8.4	0.1787	-	0.6643	0.1619	3.1913
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PID	$\frac{-0.157399(z-1.0562)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	7.9	0.1799	-	0.5948	0.1449	3.0261
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PID	$\frac{-0.158409(z-1.0562)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	7.5	0.1811	-	0.5359	0.1304	2.8939
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PID	$\frac{-0.159049(z-1.0562)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	7.2	0.1822	-	0.4851	0.1180	2.7837
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PID	$\frac{-0.159370(z-1.0562)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	6.8	0.1832	-	0.4407	0.1074	2.6924

Tabela 50 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.006926(z-0.9938)}{z(z-1)}$	10.3	0.0048	1.49	1.1010	0.2695	4.1709
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PI	$\frac{0.007711(z-0.9939)}{z(z-1)}$	9.5	0.0051	1.45	0.9515	0.2327	3.7962
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.008498(z-0.9940)}{z(z-1)}$	8.8	0.0055	1.47	0.8319	0.2031	3.5044
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.009285(z-0.9940)}{z(z-1)}$	8.2	0.0058	1.43	0.7324	0.1788	3.2484
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PI	$\frac{0.010073(z-0.9941)}{z(z-1)}$	7.7	0.0062	1.40	0.6499	0.1587	3.0362
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.010860(z-0.9941)}{z(z-1)}$	7.3	0.0066	1.37	0.5818	0.1418	2.8689
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.011647(z-0.9942)}{z(z-1)}$	6.9	0.0069	1.35	0.5237	0.1276	2.7405
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.012433(z-0.9942)}{z(z-1)}$	6.5	0.0073	1.32	0.4738	0.1154	2.6353
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.013219(z-0.9942)}{z(z-1)}$	6.2	0.0077	1.27	0.4306	0.1049	2.5481

Tabela 51 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PI	$\frac{0.007300(z-0.9943)}{z(z-1)}$	11.1	0.1644	-	1.1025	0.2697	4.1166
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Sem	PI	$\frac{0.008129(z-0.9944)}{z(z-1)}$	10.4	0.1648	-	0.9542	0.2333	3.7444
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PI	$\frac{0.008958(z-0.9945)}{z(z-1)}$	9.7	0.1652	-	0.8358	0.2039	3.4553
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.009787(z-0.9945)}{z(z-1)}$	9.1	0.1655	-	0.7368	0.1799	3.2016
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Sem	PI	$\frac{0.010615(z-0.9946)}{z(z-1)}$	8.6	0.1660	-	0.6558	0.1599	3.0018
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PI	$\frac{0.011442(z-0.9946)}{z(z-1)}$	8.1	0.1665	-	0.5874	0.1432	2.8421
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PI	$\frac{0.012269(z-0.9947)}{z(z-1)}$	7.8	0.1670	-	0.5294	0.1289	2.7169
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PI	$\frac{0.013095(z-0.9947)}{z(z-1)}$	7.3	0.1675	-	0.4796	0.1168	2.6124
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PI	$\frac{0.013920(z-0.9948)}{z(z-1)}$	7.0	0.1681	-	0.4365	0.1063	2.5275

Tabela 52 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{-0.139527(z-1.0558)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	10.6	0.0212	-	1.1315	0.2769	4.3890
15	$\frac{0.00016293z}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PID	$\frac{-0.141842(z-1.0606)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	9.9	0.0221	-	0.9785	0.2393	4.0153
25	$\frac{0.00019222z}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{-0.143335(z-1.0656)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	9.1	0.0229	-	0.8558	0.2089	3.7188
35	$\frac{0.00022390z}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{-0.144168(z-1.0708)(z-0.9948)}{z(z-1)}$	8.5	0.0236	-	0.7540	0.1840	3.4520
45	$\frac{0.00025794z}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PID	$\frac{-0.144461(z-1.0763)(z-0.9948)}{z(z-1)}$	8.0	0.0241	-	0.6699	0.1634	3.2374
55	$\frac{0.00029433z}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{-0.144303(z-1.0558)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	7.6	0.0246	-	0.5990	0.1460	3.0561
65	$\frac{0.00033307z}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{-0.143766(z-1.0558)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	7.1	0.0249	-	0.5396	0.1313	2.9212
75	$\frac{0.00037415z}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{-0.142903(z-1.0558)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	6.8	0.0252	-	0.4879	0.1188	2.8084
85	$\frac{0.00041755z}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{-0.141762(z-1.0558)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	6.4	0.0255	-	0.4430	0.1079	2.7143

Tabela 53 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PID	$\frac{-0.139645(z-1.0583)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	10.9	0.1715	-	1.1079	0.2710	4.2950
15	$\frac{0.00016293z}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Sem	PID	$\frac{-0.143350(z-1.0627)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	10.2	0.1731	-	0.9584	0.2341	3.9253
25	$\frac{0.00019222z}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PID	$\frac{-0.146133(z-1.0674)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	9.5	0.1746	-	0.8377	0.2043	3.6323
35	$\frac{0.00022390z}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{-0.148168(z-1.0722)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	8.7	0.1759	-	0.7381	0.1800	3.3764
45	$\frac{0.00025794z}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Sem	PID	$\frac{-0.149586(z-1.0772)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	8.4	0.1771	-	0.6556	0.1598	3.1639
55	$\frac{0.00029433z}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PID	$\frac{-0.150490(z-1.0583)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	7.9	0.1782	-	0.5866	0.1428	3.0036
65	$\frac{0.00033307z}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PID	$\frac{-0.150958(z-1.0583)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	7.5	0.1792	-	0.5279	0.1285	2.8725
75	$\frac{0.00037415z}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PID	$\frac{-0.151054(z-1.0583)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	7.1	0.1802	-	0.4776	0.1162	2.7636
85	$\frac{0.00041755z}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PID	$\frac{-0.150830(z-1.0583)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	6.8	0.1811	-	0.4341	0.1056	2.6749

Tabela 54 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.007001(z-0.9938)}{(z-1)}$	10.6	0.0048	1.40	1.0917	0.2672	4.1436
15	$\frac{0.00016293z}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PI	$\frac{0.007798(z-0.9939)}{(z-1)}$	9.6	0.0051	1.35	0.9428	0.2306	3.7692
25	$\frac{0.00019222z}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.008597(z-0.9940)}{(z-1)}$	8.8	0.0055	1.35	0.8235	0.2010	3.4783
35	$\frac{0.00022390z}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.009398(z-0.9941)}{(z-1)}$	8.3	0.0058	1.31	0.7248	0.1769	3.2229
45	$\frac{0.00025794z}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PI	$\frac{0.010199(z-0.9941)}{(z-1)}$	7.7	0.0062	1.28	0.6431	0.1569	3.0139
55	$\frac{0.00029433z}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.011001(z-0.9942)}{(z-1)}$	7.3	0.0065	1.24	0.5746	0.1401	2.8498
65	$\frac{0.00033307z}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.011804(z-0.9942)}{(z-1)}$	6.9	0.0069	1.21	0.5172	0.1259	2.7227
75	$\frac{0.00037415z}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.012606(z-0.9942)}{(z-1)}$	6.6	0.0073	1.17	0.4674	0.1138	2.6199
85	$\frac{0.00041755z}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.013408(z-0.9943)}{(z-1)}$	6.2	0.0077	1.14	0.4247	0.1034	2.5336

Tabela 55 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PI	$\frac{0.007372(z-0.9943)}{(z-1)}$	11.1	0.1640	-	1.0928	0.2673	4.0882
15	$\frac{0.00016293z}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Sem	PI	$\frac{0.008213(z-0.9944)}{(z-1)}$	10.4	0.1644	-	0.9454	0.2310	3.7195
25	$\frac{0.00019222z}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PI	$\frac{0.009054(z-0.9945)}{(z-1)}$	9.7	0.1648	-	0.8269	0.2017	3.4302
35	$\frac{0.00022390z}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.009895(z-0.9946)}{(z-1)}$	9.1	0.1652	-	0.7289	0.1778	3.1776
45	$\frac{0.00025794z}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Sem	PI	$\frac{0.010737(z-0.9946)}{(z-1)}$	8.5	0.1656	-	0.6475	0.1579	2.9796
55	$\frac{0.00029433z}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PI	$\frac{0.011578(z-0.9947)}{(z-1)}$	8.2	0.1661	-	0.5799	0.1412	2.8233
65	$\frac{0.00033307z}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PI	$\frac{0.012420(z-0.9947)}{(z-1)}$	7.6	0.1666	-	0.5222	0.1271	2.6994
75	$\frac{0.00037415z}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PI	$\frac{0.013261(z-0.9948)}{(z-1)}$	7.4	0.1672	-	0.4726	0.1150	2.5963
85	$\frac{0.00041755z}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PI	$\frac{0.014103(z-0.9948)}{(z-1)}$	7.0	0.1677	-	0.4296	0.1046	2.5122

Tabela 56 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z^2}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{-0.135153(z-1.0580)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	10.6	0.0202	-	1.1206	0.2742	4.3571
15	$\frac{0.00016293z^2}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.0	Com	PID	$\frac{-0.136934(z-1.0632)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	9.8	0.0210	-	0.9685	0.2367	3.9835
25	$\frac{0.00019222z^2}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{-0.137892(z-1.0687)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	9.1	0.0217	-	0.8461	0.2065	3.6890
35	$\frac{0.00022390z^2}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{-0.138187(z-1.0745)(z-0.9948)}{z(z-1)}$	8.5	0.0222	-	0.7447	0.1818	3.4217
45	$\frac{0.00025794z^2}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.3	Com	PID	$\frac{-0.137938(z-1.0806)(z-0.9948)}{z(z-1)}$	8.0	0.0226	-	0.6610	0.1612	3.2080
55	$\frac{0.00029433z^2}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{-0.137237(z-1.0580)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	7.6	0.0229	-	0.5908	0.1440	3.0334
65	$\frac{0.00033307z^2}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{-0.136153(z-1.0580)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	7.1	0.0231	-	0.5314	0.1294	2.8987
75	$\frac{0.00037415z^2}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{-0.134743(z-1.0580)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	6.8	0.0233	-	0.4801	0.1169	2.7870
85	$\frac{0.00041755z^2}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{-0.133051(z-1.0580)(z-0.9947)}{z(z-1)}$	6.4	0.0234	-	0.4357	0.1061	2.6950

Tabela 57 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z^2}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PID	$\frac{-0.135322(z-1.0605)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	11.0	0.1705	-	1.1079	0.2684	4.2649
15	$\frac{0.00016293z^2}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.0	Sem	PID	$\frac{-0.138480(z-1.0654)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	10.3	0.1720	-	0.9584	0.2316	3.8962
25	$\frac{0.00019222z^2}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PID	$\frac{-0.140713(z-1.0705)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	9.5	0.1733	-	0.8377	0.2020	3.6021
35	$\frac{0.00022390z^2}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{-0.142193(z-1.0758)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	8.9	0.1744	-	0.7381	0.1778	3.3493
45	$\frac{0.00025794z^2}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.3	Sem	PID	$\frac{-0.143055(z-1.0813)(z-0.9951)}{z(z-1)}$	8.4	0.1755	-	0.6556	0.1577	3.1383
55	$\frac{0.00029433z^2}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PID	$\frac{-0.143398(z-1.0605)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	7.9	0.1765	-	0.5866	0.1408	2.9810
65	$\frac{0.00033307z^2}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PID	$\frac{-0.143304(z-1.0605)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	7.5	0.1774	-	0.5279	0.1266	2.8519
75	$\frac{0.00037415z^2}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PID	$\frac{-0.142835(z-1.0605)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	7.1	0.1782	-	0.4776	0.1144	2.7445
85	$\frac{0.00041755z^2}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PID	$\frac{-0.142044(z-1.0605)(z-0.9949)}{z(z-1)}$	6.8	0.1790	-	0.4341	0.1038	2.6572

Tabela 58 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z^2}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.007077(z-0.9939)}{(z-1)}$	10.4	0.0048	1.40	1.0821	0.2649	4.1166
15	$\frac{0.00016293z^2}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.0	Com	PI	$\frac{0.007886(z-0.9940)}{(z-1)}$	9.6	0.0051	1.35	0.9342	0.2284	3.7426
25	$\frac{0.00019222z^2}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.008698(z-0.9941)}{(z-1)}$	8.9	0.0054	1.35	0.8154	0.1990	3.4528
35	$\frac{0.00022390z^2}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.009512(z-0.9941)}{(z-1)}$	8.6	0.0058	1.31	0.7168	0.1750	3.1977
45	$\frac{0.00025794z^2}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.3	Com	PI	$\frac{0.010327(z-0.9942)}{(z-1)}$	7.8	0.0062	1.28	0.6357	0.1551	2.9926
55	$\frac{0.00029433z^2}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.011144(z-0.9942)}{(z-1)}$	7.3	0.0065	1.24	0.5677	0.1384	2.8306
65	$\frac{0.00033307z^2}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.011962(z-0.9943)}{(z-1)}$	6.9	0.0069	1.21	0.5105	0.1243	2.7054
75	$\frac{0.00037415z^2}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.012781(z-0.9943)}{(z-1)}$	6.6	0.0073	1.17	0.4610	0.1123	2.6034
85	$\frac{0.00041755z^2}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.013601(z-0.9943)}{(z-1)}$	6.3	0.0077	1.14	0.4186	0.1019	2.5196

Tabela 59 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z^2}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PI	$\frac{0.007445(z-0.9943)}{(z-1)}$	11.1	0.1637	-	1.0830	0.2649	4.0595
15	$\frac{0.00016293z^2}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.0	Sem	PI	$\frac{0.008298(z-0.9944)}{(z-1)}$	10.3	0.1640	-	0.9362	0.2287	3.6962
25	$\frac{0.00019222z^2}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PI	$\frac{0.009151(z-0.9945)}{(z-1)}$	9.7	0.1644	-	0.8181	0.1996	3.4051
35	$\frac{0.00022390z^2}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.010005(z-0.9946)}{(z-1)}$	9.1	0.1648	-	0.7206	0.1757	3.1539
45	$\frac{0.00025794z^2}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.3	Sem	PI	$\frac{0.010860(z-0.9947)}{(z-1)}$	8.6	0.1652	-	0.6398	0.1559	2.9578
55	$\frac{0.00029433z^2}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PI	$\frac{0.011716(z-0.9947)}{(z-1)}$	8.4	0.1657	-	0.5721	0.1393	2.8048
65	$\frac{0.00033307z^2}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PI	$\frac{0.012573(z-0.9947)}{(z-1)}$	7.7	0.1662	-	0.5144	0.1253	2.6818
75	$\frac{0.00037415z^2}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PI	$\frac{0.013431(z-0.9948)}{(z-1)}$	7.3	0.1668	-	0.4654	0.1133	2.5807
85	$\frac{0.00041755z^2}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PI	$\frac{0.014289(z-0.9948)}{(z-1)}$	7.0	0.1674	-	0.4231	0.1029	2.4979

Tabela 60 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.

- $k_p = 43.75 \times 10^{-3}$

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Com	PID	$\frac{0.123740(z-0.9971)(z-0.8809)}{z(z-1)}$	21.9	0.0181	-	0.7140	0.1786	2.7920
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PID	$\frac{0.139443(z-0.9971)(z-0.8780)}{z(z-1)}$	20.3	0.0220	-	0.5642	0.1401	2.5283
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PID	$\frac{0.139443(z-0.9971)(z-0.8780)}{z(z-1)}$	20.2	0.0220	-	0.5642	0.1401	2.5283
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Com	PID	$\frac{0.168096(z-0.9972)(z-0.8729)}{z(z-1)}$	18.0	0.0300	-	0.3864	0.0952	2.2392
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Com	PID	$\frac{0.181289(z-0.9972)(z-0.8706)}{z(z-1)}$	17.0	0.0340	-	0.3310	0.0813	2.1573
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Com	PID	$\frac{0.205895(z-0.9973)(z-0.8665)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Com	PID	$\frac{0.249922(z-0.9974)(z-0.8603)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Com	PID	$\frac{0.308091(z-0.9976)(z-0.8552)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Com	PID	$\frac{0.431800(z-0.8532)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 61 – PID com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução	$T_d(z)$	t_s	$L(z)$	Classe	Controlador	t_s	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
t_s (%)		$T_d(z)$ (ms)			VRFT	(ms)		(%)			
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Sem	PID	$\frac{0.132998(z-0.9971)(z-0.8867)}{z(z-1)}$	21.2	0.0954	-	0.6793	0.1694	2.7306
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{0.152776(z-0.9971)(z-0.8852)}{z(z-1)}$	19.3	0.1018	-	0.5248	0.1299	2.4643
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{0.152776(z-0.9971)(z-0.8852)}{z(z-1)}$	19.3	0.1018	-	0.5248	0.1299	2.4643
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Sem	PID	$\frac{0.190402(z-0.9971)(z-0.8824)}{z(z-1)}$	16.5	0.1156	-	0.3423	0.0839	2.1780
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Sem	PID	$\frac{0.208347(z-0.9971)(z-0.8810)}{z(z-1)}$	15.4	0.1230	-	0.2856	0.0698	2.1005
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Sem	PID	$\frac{0.242721(z-0.9970)(z-0.8784)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Sem	PID	$\frac{0.306433(z-0.9970)(z-0.8734)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Sem	PID	$\frac{0.392739(z-0.9970)(z-0.8671)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Sem	PID	$\frac{0.580015(z-0.9968)(z-0.8557)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 62 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução	$T_d(z)$	t_s	$L(z)$	Classe	Controlador	t_s	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
t_s (%)		$T_d(z)$ (ms)			VRFT	(ms)		(%)			
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Com	PI	$\frac{0.015072(z-0.9974)}{(z-1)}$	23.3	0.0077	-	0.7609	0.1924	2.9230
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.017381(z-0.9974)}{(z-1)}$	22.0	0.0087	-	0.6116	0.1537	2.6463
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.017381(z-0.9974)}{(z-1)}$	21.9	0.0087	-	0.6116	0.1537	2.6463
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Com	PI	$\frac{0.021824(z-0.9975)}{(z-1)}$	20.5	0.0106	-	0.4352	0.1088	2.3349
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Com	PI	$\frac{0.023958(z-0.9976)}{(z-1)}$	20.0	0.0115	-	0.3812	0.0952	2.2432
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Com	PI	$\frac{0.028055(z-0.9978)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Com	PI	0.035599	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Com	PI	0.045483	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Com	PI	0.064697	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 63 – PI com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução	$T_d(z)$	t_s	$L(z)$	Classe	Controlador	t_s	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
t_s (%)		$T_d(z)$ (ms)			VRFT	(ms)		(%)			
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Sem	PI	$\frac{0.015435(z-0.9972)}{(z-1)}$	21.2	0.0779	-	0.6907	0.1726	2.8156
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.017949(z-0.9972)}{(z-1)}$	19.3	0.0800	-	0.5342	0.1325	2.5341
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.017949(z-0.9972)}{(z-1)}$	19.3	0.0800	-	0.5342	0.1325	2.5341
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Sem	PI	$\frac{0.022912(z-0.9972)}{(z-1)}$	16.4	0.0843	-	0.3492	0.0857	2.2264
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Sem	PI	$\frac{0.025362(z-0.9972)}{(z-1)}$	15.3	0.0864	-	0.2916	0.0713	2.1398
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Sem	PI	$\frac{0.030201(z-0.9972)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Sem	PI	$\frac{0.039654(z-0.9972)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Sem	PI	$\frac{0.053337(z-0.9971)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Sem	PI	$\frac{0.085562(z-0.9970)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 64 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{-0.069710(z-1.1489)(z-0.9964)}{z(z-1)}$	18.3	0.0125	-	1.0495	0.2591	3.8254
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PID	$\frac{-0.066514(z-1.1720)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	17.2	0.0129	-	0.9037	0.2225	3.4937
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{-0.062778(z-1.1990)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	16.5	0.0133	-	0.7879	0.1935	3.2415
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{-0.058649(z-1.2308)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	15.6	0.0136	-	0.6936	0.1702	3.0430
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PID	$\frac{-0.054234(z-1.2686)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	15.1	0.0139	-	0.6170	0.1512	2.8844
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{-0.049612(z-1.3142)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	14.5	0.0143	-	0.5536	0.1354	2.7559
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{-0.044841(z-1.3701)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	14.3	0.0146	-	0.5001	0.1222	2.6503
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{-0.039967(z-1.4401)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	13.5	0.0149	-	0.4549	0.1110	2.5619
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{-0.035022(z-1.5304)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	13.2	0.0152	-	0.4157	0.1014	2.4881

Tabela 65 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PID	$\frac{-0.075444(z-1.1431)(z-0.9967)}{z(z-1)}$	20.4	0.0962	-	1.0728	0.2669	3.8188
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Sem	PID	$\frac{-0.072818(z-1.1637)(z-0.9968)}{z(z-1)}$	19.4	0.0967	-	0.9227	0.2288	3.4871
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PID	$\frac{-0.069407(z-1.1879)(z-0.9968)}{z(z-1)}$	18.7	0.0971	-	0.8025	0.1985	3.2323
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{-0.065371(z-1.2166)(z-0.9968)}{z(z-1)}$	17.8	0.0975	-	0.7049	0.1740	3.0307
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Sem	PID	$\frac{-0.060832(z-1.2510)(z-0.9968)}{z(z-1)}$	17.1	0.0980	-	0.6248	0.1539	2.8682
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PID	$\frac{-0.055889(z-1.2930)(z-0.9968)}{z(z-1)}$	16.5	0.0985	-	0.5576	0.1371	2.7362
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PID	$\frac{-0.050618(z-1.3452)(z-0.9969)}{z(z-1)}$	15.9	0.0990	-	0.5013	0.1230	2.6263
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PID	$\frac{-0.045081(z-1.4119)(z-0.9969)}{z(z-1)}$	15.5	0.0995	-	0.4534	0.1111	2.5351
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PID	$\frac{-0.039328(z-1.4998)(z-0.9969)}{z(z-1)}$	15.0	0.1001	-	0.4120	0.1008	2.4581

Tabela 66 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.010085(z-0.9962)}{(z-1)}$	17.3	0.0081	-	1.0052	0.2474	3.6066
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PI	$\frac{0.011156(z-0.9962)}{(z-1)}$	16.3	0.0088	-	0.8647	0.2122	3.2920
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.012218(z-0.9962)}{(z-1)}$	15.6	0.0095	-	0.7530	0.1845	3.0520
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.013272(z-0.9963)}{(z-1)}$	14.8	0.0103	-	0.6629	0.1623	2.8665
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PI	$\frac{0.014316(z-0.9963)}{(z-1)}$	14.2	0.0110	-	0.5895	0.1442	2.7184
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.015349(z-0.9963)}{(z-1)}$	13.7	0.0117	-	0.5290	0.1292	2.6004
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.016372(z-0.9964)}{(z-1)}$	13.3	0.0124	-	0.4785	0.1167	2.5045
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.017382(z-0.9964)}{(z-1)}$	12.8	0.0131	-	0.4354	0.1061	2.4253
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.018381(z-0.9964)}{(z-1)}$	12.8	0.0137	-	0.3989	0.0971	2.3595

Tabela 67 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PI	$\frac{0.010502(z-0.9966)}{(z-1)}$	20.5	0.0964	-	1.0580	0.2628	3.6435
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Sem	PI	$\frac{0.011635(z-0.9966)}{(z-1)}$	19.5	0.0968	-	0.9106	0.2255	3.3281
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PI	$\frac{0.012766(z-0.9967)}{(z-1)}$	18.7	0.0972	-	0.7927	0.1958	3.0824
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.013893(z-0.9967)}{(z-1)}$	17.8	0.0978	-	0.6967	0.1718	2.8892
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Sem	PI	$\frac{0.015016(z-0.9967)}{(z-1)}$	17.2	0.0983	-	0.6180	0.1521	2.7345
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PI	$\frac{0.016134(z-0.9968)}{(z-1)}$	16.7	0.0989	-	0.5521	0.1357	2.6091
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PI	$\frac{0.017249(z-0.9968)}{(z-1)}$	16.3	0.0996	-	0.4969	0.1218	2.5058
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PI	$\frac{0.018358(z-0.9968)}{(z-1)}$	15.6	0.1003	-	0.4495	0.1101	2.4205
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PI	$\frac{0.019462(z-0.9968)}{(z-1)}$	15.1	0.1010	-	0.4090	0.1000	2.3495

Tabela 68 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{-0.064732(z-1.1614)(z-0.9964)}{z(z-1)}$	18.4	0.0119	-	1.0415	0.2572	3.8020
15	$\frac{0.00016293z}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PID	$\frac{-0.060952(z-1.1890)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	17.3	0.0123	-	0.8960	0.2207	3.4732
25	$\frac{0.00019222z}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{-0.056639(z-1.2221)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	16.5	0.0126	-	0.7809	0.1919	3.2228
35	$\frac{0.00022390z}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{-0.051939(z-1.2625)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	15.8	0.0129	-	0.6874	0.1688	3.0256
45	$\frac{0.00025794z}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PID	$\frac{-0.046960(z-1.3125)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	15.2	0.0132	-	0.6115	0.1498	2.8688
55	$\frac{0.00029433z}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{-0.041780(z-1.3760)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	14.6	0.0135	-	0.5481	0.1341	2.7413
65	$\frac{0.00033307z}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{-0.036459(z-1.4589)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	14.2	0.0138	-	0.4949	0.1210	2.6375
75	$\frac{0.00037415z}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{-0.031041(z-1.5716)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	13.7	0.0142	-	0.4499	0.1099	2.5457
85	$\frac{0.00041755z}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{-0.025557(z-1.7333)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	13.2	0.0145	-	0.4114	0.1004	2.4587

Tabela 69 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.010170(z-0.9962)}{(z-1)}$	17.5	0.0081	-	1.0006	0.2462	3.5889
15	$\frac{0.00016293z}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PI	$\frac{0.011253(z-0.9962)}{(z-1)}$	16.5	0.0088	-	0.8600	0.2112	3.2782
25	$\frac{0.00019222z}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.012329(z-0.9963)}{(z-1)}$	15.7	0.0095	-	0.7489	0.1837	3.0408
35	$\frac{0.00022390z}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.013396(z-0.9963)}{(z-1)}$	14.9	0.0102	-	0.6596	0.1615	2.8561
45	$\frac{0.00025794z}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PI	$\frac{0.014454(z-0.9963)}{(z-1)}$	14.5	0.0109	-	0.5868	0.1435	2.7096
55	$\frac{0.00029433z}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.015502(z-0.9964)}{(z-1)}$	14.0	0.0116	-	0.5266	0.1287	2.5924
65	$\frac{0.00033307z}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.016539(z-0.9964)}{(z-1)}$	13.6	0.0123	-	0.4762	0.1162	2.4972
75	$\frac{0.00037415z}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.017566(z-0.9964)}{(z-1)}$	13.0	0.0129	-	0.4338	0.1058	2.4185
85	$\frac{0.00041755z}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.018580(z-0.9965)}{(z-1)}$	12.9	0.0136	-	0.3972	0.0968	2.3536

Tabela 70 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z^2}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{-0.059711(z-1.1760)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	18.5	0.0113	-	1.0337	0.2553	3.7782
15	$\frac{0.00016293z^2}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.0	Com	PID	$\frac{-0.055342(z-1.2095)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	17.3	0.0117	-	0.8887	0.2190	3.4523
25	$\frac{0.00019222z^2}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{-0.050448(z-1.2511)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	16.7	0.0120	-	0.7743	0.1903	3.2040
35	$\frac{0.00022390z^2}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{-0.045174(z-1.3040)(z-0.9965)}{z(z-1)}$	15.9	0.0123	-	0.6815	0.1673	3.0088
45	$\frac{0.00025794z^2}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.3	Com	PID	$\frac{-0.039628(z-1.3732)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	15.3	0.0126	-	0.6057	0.1485	2.8535
55	$\frac{0.00029433z^2}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{-0.033888(z-1.4672)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	14.8	0.0129	-	0.5429	0.1329	2.7283
65	$\frac{0.00033307z^2}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{-0.028014(z-1.6021)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	14.3	0.0132	-	0.4900	0.1198	2.6111
75	$\frac{0.00037415z^2}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{-0.022048(z-1.8115)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	13.8	0.0135	-	0.4454	0.1088	2.5096
85	$\frac{0.00041755z^2}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{-0.016023(z-2.1799)(z-0.9966)}{z(z-1)}$	13.5	0.0139	-	0.4071	0.0993	2.4246

Tabela 71 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z^2}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.010256(z-0.9962)}{z(z-1)}$	17.7	0.0080	-	0.9956	0.2451	3.5721
15	$\frac{0.00016293z^2}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.0	Com	PI	$\frac{0.011351(z-0.9963)}{z(z-1)}$	16.7	0.0087	-	0.8560	0.2103	3.2649
25	$\frac{0.00019222z^2}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.012440(z-0.9963)}{z(z-1)}$	15.9	0.0094	-	0.7453	0.1828	3.0294
35	$\frac{0.00022390z^2}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.013521(z-0.9964)}{z(z-1)}$	15.2	0.0101	-	0.6566	0.1608	2.8463
45	$\frac{0.00025794z^2}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.3	Com	PI	$\frac{0.014593(z-0.9964)}{z(z-1)}$	14.6	0.0108	-	0.5844	0.1429	2.7010
55	$\frac{0.00029433z^2}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.015655(z-0.9964)}{z(z-1)}$	14.2	0.0115	-	0.5244	0.1281	2.5852
65	$\frac{0.00033307z^2}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.016707(z-0.9965)}{z(z-1)}$	13.8	0.0122	-	0.4744	0.1158	2.4904
75	$\frac{0.00037415z^2}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.017749(z-0.9965)}{z(z-1)}$	13.4	0.0128	-	0.4321	0.1054	2.4125
85	$\frac{0.00041755z^2}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.018779(z-0.9965)}{z(z-1)}$	13.2	0.0135	-	0.3962	0.0965	2.3477

Tabela 72 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.

- $k_p = 87.50 \times 10^{-3}$

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Com	PID	$\frac{0.154146(z-0.9976)(z-0.8870)}{z(z-1)}$	24.9	0.0270	-	0.6480	0.1655	2.6143
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PID	$\frac{0.176291(z-0.9976)(z-0.8864)}{z(z-1)}$	23.1	0.0335	-	0.5087	0.1287	2.3913
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PID	$\frac{0.176291(z-0.9976)(z-0.8864)}{z(z-1)}$	22.8	0.0335	-	0.5087	0.1287	2.3913
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Com	PID	$\frac{0.218230(z-0.9976)(z-0.8853)}{z(z-1)}$	20.0	0.0476	-	0.3460	0.0864	2.1509
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Com	PID	$\frac{0.238137(z-0.9976)(z-0.8849)}{z(z-1)}$	19.2	0.0552	-	0.2954	0.0735	2.0849
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Com	PID	$\frac{0.276060(z-0.9976)(z-0.8844)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Com	PID	$\frac{0.345314(z-0.9977)(z-0.8839)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Com	PID	$\frac{0.435489(z-0.9980)(z-0.8838)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Com	PID	$\frac{0.603606(z-0.8826)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 73 – PID com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Sem	PID	$\frac{0.160984(z-0.9976)(z-0.8881)}{z(z-1)}$	24.7	0.1040	-	0.6144	0.1568	2.5579
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{0.186081(z-0.9976)(z-0.8876)}{z(z-1)}$	22.3	0.1137	-	0.4726	0.1192	2.3344
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{0.186081(z-0.9976)(z-0.8876)}{z(z-1)}$	22.3	0.1137	-	0.4726	0.1192	2.3344
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Sem	PID	$\frac{0.234861(z-0.9976)(z-0.8866)}{z(z-1)}$	19.1	0.1351	-	0.3062	0.0761	2.0999
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Sem	PID	$\frac{0.258584(z-0.9976)(z-0.8861)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Sem	PID	$\frac{0.304800(z-0.9975)(z-0.8853)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Sem	PID	$\frac{0.392803(z-0.9975)(z-0.8837)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Sem	PID	$\frac{0.515448(z-0.9974)(z-0.8816)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Sem	PID	$\frac{0.784511(z-0.9973)(z-0.8770)}{z(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 74 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Com	PI	$\frac{0.017774(z-0.9978)}{(z-1)}$	26.9	0.0106	-	0.7065	0.1841	2.7416
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.020449(z-0.9979)}{(z-1)}$	25.8	0.0120	-	0.5689	0.1475	2.5078
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.020449(z-0.9979)}{(z-1)}$	25.6	0.0120	-	0.5689	0.1475	2.5078
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Com	PI	0.0255550	-	-	Satura	-	-	-
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Com	PI	0.027979	-	-	Satura	-	-	-
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Com	PI	0.032602	-	-	Satura	-	-	-
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Com	PI	0.040982	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Com	PI	0.051740	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Com	PI	$\frac{0.072157(z-1.003)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 75 – PI com filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.006}{(z-0.994)}$	13.0	Sem	PI	$\frac{0.018381(z-0.9977)}{(z-1)}$	24.9	0.0798	-	0.6279	0.1608	2.6325
15	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.021347(z-0.9977)}{(z-1)}$	22.5	0.0829	-	0.4837	0.1224	2.3956
25	$\frac{0.007}{(z-0.993)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.021347(z-0.9977)}{(z-1)}$	22.4	0.0829	-	0.4837	0.1224	2.3956
35	$\frac{0.009}{(z-0.991)}$	8.7	Sem	PI	$\frac{0.027182(z-0.9977)}{(z-1)}$	19.3	0.0890	-	0.3141	0.0784	2.1401
45	$\frac{0.010}{(z-0.990)}$	7.8	Sem	PI	$\frac{0.030053(z-0.9977)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
55	$\frac{0.012}{(z-0.988)}$	6.5	Sem	PI	$\frac{0.035704(z-0.9977)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
65	$\frac{0.016}{(z-0.984)}$	4.9	Sem	PI	$\frac{0.046671(z-0.9976)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
75	$\frac{0.022}{(z-0.978)}$	3.5	Sem	PI	$\frac{0.062389(z-0.9976)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-
85	$\frac{0.037}{(z-0.963)}$	2.1	Sem	PI	$\frac{0.098808(z-0.9975)}{(z-1)}$	-	-	Satura	-	-	-

Tabela 76 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de primeira ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{-0.079787(z-1.1552)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	21.1	0.0170	-	0.9311	0.2325	3.4655
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PID	$\frac{-0.075372(z-1.1808)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	20.0	0.0175	-	0.7969	0.1982	3.1922
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{-0.070126(z-1.2119)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	19.0	0.0180	-	0.6913	0.1713	2.9802
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{-0.064219(z-1.2505)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	18.4	0.0184	-	0.6065	0.1498	2.8128
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PID	$\frac{-0.057779(z-1.2993)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	17.4	0.0187	-	0.5370	0.1323	2.6784
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{-0.050908(z-1.3632)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	16.8	0.0191	-	0.4796	0.1179	2.5702
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{-0.043684(z-1.4503)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	16.1	0.0195	-	0.4314	0.1059	2.4808
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{-0.036171(z-1.5761)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	15.5	0.0199	-	0.3908	0.0958	2.4080
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{-0.028421(z-1.7737)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	15.1	0.0203	-	0.3563	0.0872	2.3387

Tabela 77 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PID	$\frac{-0.086160(z-1.1509)(z-0.9973)}{z(z-1)}$	24.1	0.1020	-	0.9648	0.2448	3.4651
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Sem	PID	$\frac{-0.083003(z-1.1727)(z-0.9973)}{z(z-1)}$	23.2	0.1028	-	0.8274	0.2089	3.1931
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PID	$\frac{-0.078793(z-1.1988)(z-0.9973)}{z(z-1)}$	22.9	0.1035	-	0.7183	0.1805	2.9802
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PID	$\frac{-0.073709(z-1.2305)(z-0.9974)}{z(z-1)}$	22.0	0.1043	-	0.6297	0.1577	2.8103
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Sem	PID	$\frac{-0.067890(z-1.2696)(z-0.9974)}{z(z-1)}$	21.1	0.1051	-	0.5572	0.1390	2.6733
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PID	$\frac{-0.061453(z-1.3191)(z-0.9974)}{z(z-1)}$	20.4	0.1058	-	0.4963	0.1235	2.5617
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PID	$\frac{-0.054491(z-1.3838)(z-0.9974)}{z(z-1)}$	19.6	0.1067	-	0.4454	0.1106	2.4694
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PID	$\frac{-0.047083(z-1.4717)(z-0.9974)}{z(z-1)}$	18.9	0.1075	-	0.4020	0.0996	2.3933
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PID	$\frac{-0.039293(z-1.5980)(z-0.9974)}{z(z-1)}$	17.9	0.1085	-	0.3651	0.0902	2.3301

Tabela 78 – PID sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	J_{vin}	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.012088(z-0.9967)}{(z-1)}$	19.9	0.0112	-	0.8849	0.2196	3.2577
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PI	$\frac{0.013346(z-0.9968)}{(z-1)}$	18.9	0.0123	-	0.7567	0.1871	3.0005
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.014594(z-0.9968)}{(z-1)}$	17.9	0.0133	-	0.6562	0.1617	2.8026
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.015831(z-0.9968)}{(z-1)}$	17.0	0.0143	-	0.5754	0.1415	2.6485
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PI	$\frac{0.017057(z-0.9968)}{(z-1)}$	16.4	0.0153	-	0.5100	0.1252	2.5273
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.018270(z-0.9968)}{(z-1)}$	15.7	0.0163	-	0.4562	0.1118	2.4310
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.019470(z-0.9968)}{(z-1)}$	15.3	0.0173	-	0.4116	0.1007	2.3525
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.020656(z-0.9969)}{(z-1)}$	14.9	0.0182	-	0.3738	0.0914	2.2885
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.021828(z-0.9969)}{(z-1)}$	14.5	0.0192	-	0.3419	0.0835	2.2354

Tabela 79 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Sem	PI	$\frac{0.012718(z-0.9972)}{(z-1)}$	23.9	0.1015	-	0.9483	0.2400	3.3033
15	$\frac{0.00016293}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Sem	PI	$\frac{0.014061(z-0.9972)}{(z-1)}$	22.8	0.1022	-	0.8143	0.2051	3.0429
25	$\frac{0.00019222}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Sem	PI	$\frac{0.015400(z-0.9973)}{(z-1)}$	21.8	0.1031	-	0.7078	0.1774	2.8396
35	$\frac{0.00022390}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Sem	PI	$\frac{0.016734(z-0.9973)}{(z-1)}$	21.1	0.1041	-	0.6211	0.1552	2.6788
45	$\frac{0.00025794}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Sem	PI	$\frac{0.018063(z-0.9973)}{(z-1)}$	20.3	0.1051	-	0.5500	0.1370	2.5502
55	$\frac{0.00029433}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Sem	PI	$\frac{0.019387(z-0.9973)}{(z-1)}$	19.6	0.1061	-	0.4906	0.1219	2.4469
65	$\frac{0.00033307}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Sem	PI	$\frac{0.020705(z-0.9973)}{(z-1)}$	19.0	0.1072	-	0.4407	0.1093	2.3619
75	$\frac{0.00037415}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Sem	PI	$\frac{0.022017(z-0.9974)}{(z-1)}$	18.4	0.1084	-	0.3981	0.0985	2.2916
85	$\frac{0.00041755}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Sem	PI	$\frac{0.023322(z-0.9974)}{(z-1)}$	17.9	0.1095	-	0.3618	0.0893	2.2331

Tabela 80 – PI sem filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{-0.073871(z-1.1686)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	22.2	0.0162	-	0.9246	0.2309	3.4468
15	$\frac{0.00016293z}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PID	$\frac{-0.068735(z-1.1995)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	20.1	0.0166	-	0.7909	0.1968	3.1755
25	$\frac{0.00019222z}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{-0.062774(z-1.2384)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	19.1	0.0171	-	0.6860	0.1700	2.9649
35	$\frac{0.00022390z}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{-0.056158(z-1.2885)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	18.2	0.0174	-	0.6011	0.1486	2.7991
45	$\frac{0.00025794z}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PID	$\frac{-0.049016(z-1.3555)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	17.5	0.0178	-	0.5323	0.1312	2.6658
55	$\frac{0.00029433z}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{-0.041449(z-1.4495)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	16.8	0.0182	-	0.4753	0.1169	2.5580
65	$\frac{0.00033307z}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{-0.033537(z-1.5912)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	16.3	0.0186	-	0.4275	0.1050	2.4702
75	$\frac{0.00037415z}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{-0.025344(z-1.8289)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	15.8	0.0190	-	0.3872	0.0949	2.3811
85	$\frac{0.00041755z}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{-0.016922(z-2.3103)(z-0.9971)}{z(z-1)}$	15.2	0.0195	-	0.3530	0.0864	2.3040

Tabela 81 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.012185(z-0.9968)}{(z-1)}$	20.1	0.0112	-	0.8818	0.2189	3.2463
15	$\frac{0.00016293z}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.1	Com	PI	$\frac{0.013457(z-0.9968)}{(z-1)}$	19.0	0.0122	-	0.7537	0.1865	2.9906
25	$\frac{0.00019222z}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.014719(z-0.9968)}{(z-1)}$	18.0	0.0132	-	0.6537	0.1613	2.7941
35	$\frac{0.00022390z}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.015972(z-0.9968)}{(z-1)}$	17.3	0.0142	-	0.5736	0.1412	2.6421
45	$\frac{0.00025794z}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.4	Com	PI	$\frac{0.017213(z-0.9969)}{(z-1)}$	16.6	0.0152	-	0.5085	0.1249	2.5220
55	$\frac{0.00029433z}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.018442(z-0.9969)}{(z-1)}$	16.1	0.0162	-	0.4552	0.1116	2.4258
65	$\frac{0.00033307z}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.019658(z-0.9969)}{(z-1)}$	15.5	0.0171	-	0.4108	0.1006	2.3478
75	$\frac{0.00037415z}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.020860(z-0.9969)}{(z-1)}$	15.0	0.0181	-	0.3734	0.0913	2.2845
85	$\frac{0.00041755z}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.022048(z-0.9969)}{(z-1)}$	14.7	0.0190	-	0.3418	0.0835	2.2317

Tabela 82 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z^2}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PID	$\frac{-0.067919(z-1.1845)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	21.7	0.0154	-	0.9179	0.2293	3.4286
15	$\frac{0.00016293z^2}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.0	Com	PID	$\frac{-0.062062(z-1.2224)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	20.1	0.0158	-	0.7852	0.1954	3.1592
25	$\frac{0.00019222z^2}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PID	$\frac{-0.055385(z-1.2720)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	19.3	0.0162	-	0.6804	0.1687	2.9497
35	$\frac{0.00022390z^2}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PID	$\frac{-0.048059(z-1.3395)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	18.5	0.0166	-	0.5963	0.1474	2.7856
45	$\frac{0.00025794z^2}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.3	Com	PID	$\frac{-0.040214(z-1.4364)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	16.7	0.0170	-	0.5278	0.1301	2.6534
55	$\frac{0.00029433z^2}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PID	$\frac{-0.031952(z-1.5875)(z-0.9970)}{z(z-1)}$	17.0	0.0173	-	0.4711	0.1159	2.5460
65	$\frac{0.00033307z^2}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PID	$\frac{-0.023353(z-1.8557)(z-0.9971)}{z(z-1)}$	16.4	0.0178	-	0.4238	0.1041	2.4371
75	$\frac{0.00037415z^2}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PID	$\frac{-0.014481(z-2.4623)(z-0.9971)}{z(z-1)}$	15.8	0.0183	-	0.3838	0.0941	2.3503
85	$\frac{0.00041755z^2}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PID	$\frac{-0.005389(z-5.1482)(z-0.9971)}{z(z-1)}$	15.3	0.0189	-	0.3498	0.0856	2.2834

Tabela 83 – PID com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.

Redução t_s (%)	$T_d(z)$	t_s $T_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VRFT	t_s (ms)	$J^{VR}(\rho)$	Overshoot (%)	$J_{v_{in}}$	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.00013601z^2}{(z-0.9941)(z-0.9768)}$	14.3	Com	PI	$\frac{0.012282(z-0.9968)}{(z-1)}$	20.3	0.0111	-	0.8780	0.2182	3.2349
15	$\frac{0.00016293z^2}{(z-0.9936)(z-0.9746)}$	13.0	Com	PI	$\frac{0.013567(z-0.9968)}{(z-1)}$	19.3	0.0121	-	0.7511	0.1860	2.9809
25	$\frac{0.00019222z^2}{(z-0.9930)(z-0.9724)}$	12.0	Com	PI	$\frac{0.014845(z-0.9968)}{(z-1)}$	18.3	0.0131	-	0.6513	0.1608	2.7863
35	$\frac{0.00022390z^2}{(z-0.9925)(z-0.9702)}$	11.1	Com	PI	$\frac{0.016112(z-0.9969)}{(z-1)}$	17.5	0.0141	-	0.5719	0.1408	2.6354
45	$\frac{0.00025794z^2}{(z-0.9919)(z-0.9681)}$	10.3	Com	PI	$\frac{0.017369(z-0.9969)}{(z-1)}$	16.8	0.0151	-	0.5073	0.1247	2.5161
55	$\frac{0.00029433z^2}{(z-0.9914)(z-0.9659)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.018613(z-0.9969)}{(z-1)}$	16.4	0.0161	-	0.4543	0.1114	2.4206
65	$\frac{0.00033307z^2}{(z-0.9908)(z-0.9638)}$	9.1	Com	PI	$\frac{0.019845(z-0.9969)}{(z-1)}$	15.9	0.0170	-	0.4102	0.1005	2.3432
75	$\frac{0.00037415z^2}{(z-0.9903)(z-0.9616)}$	8.6	Com	PI	$\frac{0.021063(z-0.9970)}{(z-1)}$	15.4	0.0179	-	0.3731	0.0913	2.2803
85	$\frac{0.00041755z^2}{(z-0.9897)(z-0.9594)}$	8.1	Com	PI	$\frac{0.022267(z-0.9970)}{(z-1)}$	15.1	0.0188	-	0.3418	0.0835	2.2281

Tabela 84 – PI com filtro e $T_d(z)$ de segunda ordem e GR = 0 MF.

APÊNDICE C – Controle por VDFT

Aqui são apresentados as configurações/resultados de simulação realizados para sintonia de controladores pelo método VDFT.

C.1 Dados coletados em malha aberta

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.451290z(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9940)(z+0.1635)}$	24.1	Com	PID	$\frac{0.901918(z-0.9951)(z-0.9810)}{z(z-1)}$	12.6	-	26.8	0.2797	26.2	0.0680	2.0405
15	$\frac{0.492712z(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	22.0	Com	PID	$\frac{0.798587(z-0.9949)(z-0.9763)}{z(z-1)}$	10.5	-	24.6	0.2325	24.2	0.0564	2.0194
25	$\frac{0.492712z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	22.0	Com	PID	$\frac{0.798587(z-0.9949)(z-0.9763)}{z(z-1)}$	10.5	-	24.6	0.2325	24.2	0.0564	2.0194
35	$\frac{0.580201z(z-1)}{(z-0.9939)(z-0.9910)(z+0.2349)}$	18.9	Com	PID	$\frac{0.614696(z-0.9945)(z-0.9647)}{z(z-1)}$	6.8	-	21.6	0.1750	21.4	0.0424	2.0222
45	$\frac{0.626716z(z-1)}{(z-0.9936)(z-0.9900)(z+0.2489)}$	17.6	Com	PID	$\frac{0.534814(z-0.9942)(z-0.9574)}{z(z-1)}$	5.1	-	20.5	0.1568	20.3	0.0380	2.0344
55	$\frac{0.725936z(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9880)(z+0.2677)}$	15.6	Com	PID	$\frac{0.399082(z-0.9937)(z-0.9390)}{z(z-1)}$	3.3	-	18.5	0.1315	15.2	0.0319	2.0696
65	$\frac{0.950618z(z-1)}{(z-0.9915)(z-0.9840)(z+0.2823)}$	12.6	Com	PID	$\frac{0.211737(z-0.9927)(z-0.8778)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{1.354089z(z-1)}{(z-0.9893)(z-0.9780)(z+0.2778)}$	9.8	Com	PID	$\frac{0.072000(z-0.9909)(z-0.6385)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{2.691063z(z-1)}{(z-0.9842)(z-0.9630)(z+0.2409)}$	6.4	Com	PID	$\frac{-0.017966(z-2.3022)(z-0.9872)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 85 – PID com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.329156z(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9940)(z+0.0310)}$	25.7	Sem	PID	$\frac{1.662558(z-0.9942)(z-0.9905)}{z(z-1)}$	14.1	-	27.9	0.2301	27.7	0.0558	1.9842
15	$\frac{0.346696z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)(z+0.0690)}$	24.0	Sem	PID	$\frac{1.658207(z-0.9944)(z-0.9886)}{z(z-1)}$	12.1	3.16	26.1	0.1823	26.1	0.0441	1.9911
25	$\frac{0.346696z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)(z+0.0690)}$	24.0	Sem	PID	$\frac{1.658207(z-0.9944)(z-0.9886)}{z(z-1)}$	12.1	3.16	26.1	0.1823	26.1	0.0441	1.9911
35	$\frac{0.379020z(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9910)(z+0.1329)}$	21.7	Sem	PID	$\frac{1.648326(z-0.9944)(z-0.9851)}{z(z-1)}$	8.2	9.37	23.6	0.1240	23.8	0.0299	2.0515
45	$\frac{0.394147z(z-1)}{(z-0.9949)(z-0.9900)(z+0.1602)}$	20.9	Sem	PID	$\frac{1.642570(z-0.9944)(z-0.9835)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.422861z(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9880)(z+0.2076)}$	19.6	Sem	PID	$\frac{1.629356(z-0.9943)(z-0.9804)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.475844z(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9840)(z+0.2818)}$	17.7	Sem	PID	$\frac{1.597055(z-0.9941)(z-0.9745)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.548372z(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9780)(z+0.3603)}$	15.7	Sem	PID	$\frac{1.538674(z-0.9937)(z-0.9661)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.712275z(z-1)}{(z-0.9928)(z-0.9630)(z+0.4740)}$	12.5	Sem	PID	$\frac{1.374951(z-0.9925)(z-0.9461)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 86 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{ro}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.526505z(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9940)(z+0.1635)}$	24.1	Com	PID	$\frac{0.530039(z-0.9951)(z-0.9721)}{z(z-1)}$	12.0	-	26.2	0.3803	25.4	0.0924	2.2293
15	$\frac{0.574830z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	22.0	Com	PID	$\frac{0.448952(z-0.9949)(z-0.9636)}{z(z-1)}$	9.5	-	24.4	0.3150	23.5	0.0765	2.1661
25	$\frac{0.574830z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	22.0	Com	PID	$\frac{0.448952(z-0.9949)(z-0.9636)}{z(z-1)}$	9.5	-	24.4	0.3150	23.5	0.0765	2.1661
35	$\frac{0.676902z(z-1)}{(z-0.9939)(z-0.9910)(z+0.2349)}$	18.9	Com	PID	$\frac{0.306947(z-0.9945)(z-0.9387)}{z(z-1)}$	5.9	-	21.3	0.2364	20.6	0.0574	2.1196
45	$\frac{0.731169z(z-1)}{(z-0.9936)(z-0.9900)(z+0.2489)}$	17.6	Com	PID	$\frac{0.246420(z-0.9943)(z-0.9198)}{z(z-1)}$	4.9	-	20.1	0.2116	19.2	0.0514	2.1168
55	$\frac{0.846925z(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9880)(z+0.2677)}$	15.6	Com	PID	$\frac{0.145897(z-0.9938)(z-0.8549)}{z(z-1)}$	3.7	-	15.5	0.1771	14.2	0.0430	2.1314
65	$\frac{1.09054z(z-1)}{(z-0.9915)(z-0.9840)(z+0.2823)}$	12.6	Com	PID	$\frac{0.015410(z-0.9927)(z+0.4660)}{z(z-1)}$	8.3	4.06	12.0	0.1393	10.8	0.0339	2.2306
75	$\frac{1.579770z(z-1)}{(z-0.9893)(z-0.9780)(z+0.2778)}$	9.8	Com	PID	$\frac{-0.066190(z-1.3452)(z-0.9911)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{3.139573z(z-1)}{(z-0.9842)(z-0.9630)(z+0.2409)}$	6.4	Com	PID	$\frac{-0.086545(z-1.2399)(z-0.9874)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 87 – PID com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.384016z(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9940)(z+0.0310)}$	25.7	Sem	PID	$\frac{1.212301(z-0.9942)(z-0.9888)}{z(z-1)}$	14.4	-	27.9	0.3121	27.3	0.0759	2.0335
15	$\frac{0.404478z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)(z+0.0690)}$	24.0	Sem	PID	$\frac{1.215024(z-0.9943)(z-0.9867)}{z(z-1)}$	12.7	-	26.2	0.2470	25.7	0.0599	1.9887
25	$\frac{0.404478z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)(z+0.0690)}$	24.0	Sem	PID	$\frac{1.215024(z-0.9943)(z-0.9867)}{z(z-1)}$	12.7	-	26.2	0.2470	25.7	0.0599	1.9887
35	$\frac{0.442190z(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9910)(z+0.1329)}$	21.7	Sem	PID	$\frac{1.218956(z-0.9944)(z-0.9829)}{z(z-1)}$	10.1	-	23.8	0.1677	23.6	0.0406	1.9779
45	$\frac{0.459839z(z-1)}{(z-0.9949)(z-0.9900)(z+0.1602)}$	20.9	Sem	PID	$\frac{1.219911(z-0.9944)(z-0.9811)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.493338z(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9880)(z+0.2076)}$	19.6	Sem	PID	$\frac{1.219705(z-0.9943)(z-0.9778)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.555151z(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9840)(z+0.2818)}$	17.7	Sem	PID	$\frac{1.211738(z-0.9940)(z-0.9714)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.639767z(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9780)(z+0.3603)}$	15.7	Sem	PID	$\frac{1.185929(z-0.9936)(z-0.9626)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.830987z(z-1)}{(z-0.9928)(z-0.9630)(z+0.4740)}$	12.5	Sem	PID	$\frac{1.087046(z-0.9925)(z-0.9420)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 88 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.601720z(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9940)(z+0.1635)}$	24.1	Com	PID	$\frac{0.251130(z-0.9951)(z-0.9482)}{z(z-1)}$	10.8	-	25.6	0.4955	24.3	0.1206	2.4877
15	$\frac{0.656949z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	22.0	Com	PID	$\frac{0.186726(z-0.9949)(z-0.9228)}{z(z-1)}$	8.5	-	23.6	0.4105	22.4	0.0998	2.3714
25	$\frac{0.656949z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	22.0	Com	PID	$\frac{0.186726(z-0.9949)(z-0.9228)}{z(z-1)}$	8.5	-	23.6	0.4105	22.4	0.0998	2.3714
35	$\frac{0.773092z(z-1)}{(z-0.9939)(z-0.9910)(z+0.2349)}$	18.9	Com	PID	$\frac{0.076136(z-0.9945)(z-0.7814)}{z(z-1)}$	5.9	-	20.7	0.3068	18.7	0.0746	2.2597
45	$\frac{0.835622z(z-1)}{(z-0.9936)(z-0.9900)(z+0.2489)}$	17.6	Com	PID	$\frac{0.030124(z-0.9943)(z-0.4193)}{z(z-1)}$	5.0	-	19.3	0.2742	15.5	0.0667	2.2464
55	$\frac{0.967914z(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9880)(z+0.2677)}$	15.6	Com	PID	$\frac{-0.043992(z-1.4267)(z-0.9939)}{z(z-1)}$	9.0	2.48	15.1	0.2290	13.4	0.0556	2.3716
65	$\frac{1.267490z(z-1)}{(z-0.9915)(z-0.9840)(z+0.2823)}$	12.6	Com	PID	$\frac{-0.131834(z-1.1525)(z-0.9928)}{z(z-1)}$	9.2	5.53	11.5	0.1791	10.5	0.0437	2.4136
75	$\frac{1.805452z(z-1)}{(z-0.9893)(z-0.9780)(z+0.2778)}$	9.8	Com	PID	$\frac{-0.169832(z-1.1204)(z-0.9912)}{z(z-1)}$	9.2	9.48	8.5	0.1457	8.4	0.0355	2.5307
85	$\frac{3.588084z(z-1)}{(z-0.9842)(z-0.9630)(z+0.2409)}$	6.4	Com	PID	$\frac{-0.137979(z-1.1360)(z-0.9876)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 89 – PID com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.438875z(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9940)(z+0.0310)}$	25.7	Sem	PID	$\frac{0.874609(z-0.9942)(z-0.9864)}{z(z-1)}$	13.8	-	27.3	0.4085	26.5	0.0993	2.1982
15	$\frac{0.462261z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)(z+0.0690)}$	24.0	Sem	PID	$\frac{0.882637(z-0.9943)(z-0.9841)}{z(z-1)}$	12.3	-	25.7	0.3225	25.1	0.0783	2.0943
25	$\frac{0.462261z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)(z+0.0690)}$	24.0	Sem	PID	$\frac{0.882637(z-0.9943)(z-0.9841)}{z(z-1)}$	12.3	-	25.7	0.3225	25.1	0.0783	2.0943
35	$\frac{0.505359z(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9910)(z+0.1329)}$	21.7	Sem	PID	$\frac{0.806928(z-0.9943)(z-0.9798)}{z(z-1)}$	9.8	-	23.6	0.2184	23.2	0.0529	2.0062
45	$\frac{0.525530z(z-1)}{(z-0.9949)(z-0.9900)(z+0.1602)}$	20.9	Sem	PID	$\frac{0.902918(z-0.9943)(z-0.9779)}{z(z-1)}$	8.9	-	22.8	0.1853	22.5	0.0449	1.9939
55	$\frac{0.563814z(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9880)(z+0.2076)}$	19.6	Sem	PID	$\frac{0.912467(z-0.9942)(z-0.9742)}{z(z-1)}$	7.1	-	21.5	0.1392	21.4	0.0336	1.9994
65	$\frac{0.634459z(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9840)(z+0.2818)}$	17.7	Sem	PID	$\frac{0.922750(z-0.9940)(z-0.9674)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.731162z(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9780)(z+0.3603)}$	15.7	Sem	PID	$\frac{0.921371(z-0.9936)(z-0.9582)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.949700z(z-1)}{(z-0.9928)(z-0.9630)(z+0.4740)}$	12.5	Sem	PID	$\frac{0.871117(z-0.9924)(z-0.9371)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 90 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.676935z(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9940)(z+0.1635)}$	24.1	Com	PID	$\frac{0.034201(z-0.9951)(z-0.6604)}{z(z-1)}$	10.0	-	24.9	0.6270	23.0	0.1526	2.8273
15	$\frac{0.739068z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	22.0	Com	PID	$\frac{-0.017228(z-1.7488)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	7.9	-	22.9	0.5181	20.8	0.1261	2.7584
25	$\frac{0.739068z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z+0.1933)}$	22.0	Com	PID	$\frac{-0.017228(z-1.7488)(z-0.9950)}{z(z-1)}$	7.9	-	22.9	0.5181	20.8	0.1261	2.7584
35	$\frac{0.870302z(z-1)}{(z-0.9939)(z-0.9910)(z+0.2349)}$	18.9	Com	PID	$\frac{-0.103384(z-1.1444)(z-0.9946)}{z(z-1)}$	5.8	1.58	19.7	0.3863	16.0	0.0941	2.6087
45	$\frac{0.940075z(z-1)}{(z-0.9936)(z-0.9900)(z+0.2489)}$	17.6	Com	PID	$\frac{-0.138106(z-1.1137)(z-0.9944)}{z(z-1)}$	10.6	2.18	16.4	0.3448	14.8	0.0839	2.5588
55	$\frac{1.088904z(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9880)(z+0.2677)}$	15.6	Com	PID	$\frac{-0.191683(z-1.0881)(z-0.9939)}{z(z-1)}$	11.2	3.72	14.1	0.2870	13.0	0.0698	2.5129
65	$\frac{1.425926z(z-1)}{(z-0.9915)(z-0.9840)(z+0.2823)}$	12.6	Com	PID	$\frac{-0.246358(z-1.0737)(z-0.9929)}{z(z-1)}$	10.9	6.66	11.1	0.2233	10.6	0.0545	2.5156
75	$\frac{2.031133z(z-1)}{(z-0.9893)(z-0.9780)(z+0.2778)}$	9.8	Com	PID	$\frac{-0.250443(z-1.0741)(z-0.9913)}{z(z-1)}$	9.9	10.61	8.5	0.1798	8.5	0.0439	2.6070
85	$\frac{4.036594z(z-1)}{(z-0.9842)(z-0.9630)(z+0.2409)}$	6.4	Com	PID	$\frac{-0.177983(z-1.0966)(z-0.9878)}{z(z-1)}$	11.1	17.04	15.2	0.1487	15.0	0.0363	2.8500

Tabela 91 – PID com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.493734z(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9940)(z+0.0310)}$	25.7	Sem	PID	$\frac{0.611960(z-0.9942)(z-0.9827)}{z(z-1)}$	13.0	-	26.6	0.5180	25.5	0.1260	2.4296
15	$\frac{0.520044z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)(z+0.0690)}$	24.0	Sem	PID	$\frac{0.624113(z-0.9943)(z-0.9800)}{z(z-1)}$	11.5	-	25.2	0.4089	24.4	0.0993	2.2616
25	$\frac{0.520044z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)(z+0.0690)}$	24.0	Sem	PID	$\frac{0.624113(z-0.9943)(z-0.9800)}{z(z-1)}$	11.5	-	25.2	0.4089	24.4	0.0993	2.2616
35	$\frac{0.568529z(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9910)(z+0.1329)}$	21.7	Sem	PID	$\frac{0.646462(z-0.9943)(z-0.9753)}{z(z-1)}$	9.3	-	23.3	0.2761	22.7	0.0671	2.0943
45	$\frac{0.591221z(z-1)}{(z-0.9949)(z-0.9900)(z+0.1602)}$	20.9	Sem	PID	$\frac{0.656367(z-0.9943)(z-0.9731)}{z(z-1)}$	8.3	-	22.5	0.2340	22.1	0.0568	2.0550
55	$\frac{0.634291z(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9880)(z+0.2076)}$	19.6	Sem	PID	$\frac{0.673503(z-0.9942)(z-0.9691)}{z(z-1)}$	6.7	-	21.3	0.1757	21.1	0.0426	2.0215
65	$\frac{0.713766z(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9840)(z+0.2818)}$	17.7	Sem	PID	$\frac{0.697982(z-0.9939)(z-0.9620)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.822558z(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9780)(z+0.3603)}$	15.7	Sem	PID	$\frac{0.715603(z-0.9935)(z-0.9525)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{1.068412z(z-1)}{(z-0.9928)(z-0.9630)(z+0.4740)}$	12.5	Sem	PID	$\frac{0.703173(z-0.9923)(z-0.9311)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 92 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.388388(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9940)}$	24.1	Com	PI	$\frac{0.021474(z-0.9963)}{(z-1)}$	10.4	-	28.0	0.2929	27.3	0.0711	2.1951
15	$\frac{0.413595(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	21.9	Com	PI	$\frac{0.022902(z-0.9960)}{(z-1)}$	7.9	-	25.6	0.2419	25.0	0.0586	2.1378
25	$\frac{0.413595(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	21.9	Com	PI	$\frac{0.022902(z-0.9960)}{(z-1)}$	7.9	-	25.6	0.2419	25.0	0.0586	2.1378
35	$\frac{0.471101(z-1)}{(z-0.9938)(z-0.9910)}$	18.8	Com	PI	$\frac{0.024987(z-0.9953)}{(z-1)}$	4.9	-	22.2	0.1805	21.8	0.0437	2.0954
45	$\frac{0.503401(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9900)}$	17.6	Com	PI	$\frac{0.025707(z-0.9950)}{(z-1)}$	4.1	-	21.0	0.1611	20.6	0.0390	2.0938
55	$\frac{0.575034(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9880)}$	15.6	Com	PI	$\frac{0.026645(z-0.9944)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.745986(z-1)}{(z-0.9915)(z-0.9840)}$	12.6	Com	PI	$\frac{0.027169(z-0.9931)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{1.069482(z-1)}{(z-0.9892)(z-0.9780)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.026348(z-0.9911)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{2.201063(z-1)}{(z-0.9839)(z-0.9630)}$	6.3	Com	PI	$\frac{0.022768(z-0.9866)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 93 – PI com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.319330(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9940)}$	25.7	Sem	PI	$\frac{0.025473(z-0.9966)}{(z-1)}$	10.8	-	29.7	0.2377	29.2	0.0576	2.0984
15	$\frac{0.324440(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)}$	24.0	Sem	PI	$\frac{0.028298(z-0.9964)}{(z-1)}$	8.6	-	27.6	0.1871	27.1	0.0452	2.0478
25	$\frac{0.324440(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)}$	24.0	Sem	PI	$\frac{0.028298(z-0.9964)}{(z-1)}$	8.6	-	27.6	0.1871	27.1	0.0452	2.0478
35	$\frac{0.334823(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9910)}$	21.7	Sem	PI	$\frac{0.033677(z-0.9961)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
45	$\frac{0.340074(z-1)}{(z-0.9949)(z-0.9900)}$	20.9	Sem	PI	$\frac{0.036238(z-0.9960)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.350660(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9880)}$	19.5	Sem	PI	$\frac{0.041122(z-0.9957)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.372073(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9840)}$	17.6	Sem	PI	$\frac{0.050029(z-0.9953)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.404572(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9780)}$	15.6	Sem	PI	$\frac{0.061574(z-0.9947)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.486926(z-1)}{(z-0.9928)(z-0.9630)}$	12.4	Sem	PI	$\frac{0.083551(z-0.9934)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 94 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.453119(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9940)}$	24.1	Com	PI	$\frac{0.017293(z-0.9960)}{(z-1)}$	10.1	-	27.0	0.3919	26.0	0.0953	2.3757
15	$\frac{0.482527(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	21.9	Com	PI	$\frac{0.018547(z-0.9956)}{(z-1)}$	7.9	-	24.8	0.3234	23.9	0.0785	2.2774
25	$\frac{0.482527(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	21.9	Com	PI	$\frac{0.018547(z-0.9956)}{(z-1)}$	7.9	-	24.8	0.3234	23.9	0.0785	2.2774
35	$\frac{0.549618(z-1)}{(z-0.9938)(z-0.9910)}$	18.8	Com	PI	$\frac{0.020394(z-0.9950)}{(z-1)}$	5.3	-	21.6	0.2407	20.8	0.0584	2.1878
45	$\frac{0.587301(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9900)}$	17.6	Com	PI	$\frac{0.021041(z-0.9947)}{(z-1)}$	4.5	-	20.3	0.2144	19.2	0.0521	2.1713
55	$\frac{0.670873(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9880)}$	15.6	Com	PI	$\frac{0.021906(z-0.9941)}{(z-1)}$	3.7	1.58	15.6	0.1785	14.3	0.0433	2.1681
65	$\frac{0.870316(z-1)}{(z-0.9915)(z-0.9840)}$	12.6	Com	PI	$\frac{0.022481(z-0.9927)}{(z-1)}$	8.3	4.06	12.0	0.1392	10.8	0.0339	2.2185
75	$\frac{1.247729(z-1)}{(z-0.9892)(z-0.9780)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.021974(z-0.9906)}{(z-1)}$	8.1	7.79	8.6	0.1134	8.2	0.0277	2.3374
85	$\frac{2.567907(z-1)}{(z-0.9839)(z-0.9630)}$	6.3	Com	PI	$\frac{0.019332(z-0.9861)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 95 – PI com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MA.

Redução	$Q_d(z)$	t_s	$L(z)$	Classe	Controlador	t_s	Overshoot	t_s	$J_{v_{in}}$	t_s	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
t_s (%)		$Q_d(z)$ (ms)			VDFT	(ms)	(%)	V_{in} (ms)		Carga (ms)		
5	$\frac{0.372552(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9940)}$	25.7	Sem	PI	$\frac{0.020606(z-0.9963)}{(z-1)}$	11.1	-	28.9	0.3218	28.1	0.0782	2.2355
15	$\frac{0.378514(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)}$	24.0	Sem	PI	$\frac{0.023037(z-0.9962)}{(z-1)}$	9.0	-	27.0	0.2534	26.4	0.0614	2.1416
25	$\frac{0.378514(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)}$	24.0	Sem	PI	$\frac{0.023037(z-0.9962)}{(z-1)}$	9.0	-	27.0	0.2534	26.4	0.0614	2.1416
35	$\frac{0.390627(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9910)}$	21.7	Sem	PI	$\frac{0.027666(z-0.9959)}{(z-1)}$	5.9	-	25.5	0.1707	24.1	0.0412	2.0568
45	$\frac{0.396753(z-1)}{(z-0.9949)(z-0.9900)}$	20.9	Sem	PI	$\frac{0.029869(z-0.9958)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.409104(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9880)}$	19.5	Sem	PI	$\frac{0.034069(z-0.9955)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.434085(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9840)}$	17.6	Sem	PI	$\frac{0.041728(z-0.9951)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.472001(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9780)}$	15.6	Sem	PI	$\frac{0.051655(z-0.9946)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.568089(z-1)}{(z-0.9928)(z-0.9630)}$	12.4	Sem	PI	$\frac{0.070555(z-0.9933)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 96 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MA.

Redução	$Q_d(z)$	t_s	$L(z)$	Classe	Controlador	t_s	Overshoot	t_s	$J_{v_{in}}$	t_s	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
t_s (%)		$Q_d(z)$ (ms)			VDFT	(ms)	(%)	V_{in} (ms)		Carga (ms)		
5	$\frac{0.517850(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9940)}$	24.1	Com	PI	$\frac{0.014157(z-0.9956)}{(z-1)}$	9.7	-	25.9	0.5039	24.6	0.1226	2.6034
15	$\frac{0.551460(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	21.9	Com	PI	$\frac{0.015281(z-0.9953)}{(z-1)}$	8.0	-	24.0	0.4144	22.6	0.1009	2.4563
25	$\frac{0.551460(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	21.9	Com	PI	$\frac{0.015281(z-0.9953)}{(z-1)}$	8.0	-	24.0	0.4144	22.6	0.1009	2.4563
35	$\frac{0.628135(z-1)}{(z-0.9938)(z-0.9910)}$	18.8	Com	PI	$\frac{0.016949(z-0.9947)}{(z-1)}$	5.6	-	20.8	0.3080	18.7	0.0749	2.3082
45	$\frac{0.671202(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9900)}$	17.6	Com	PI	$\frac{0.017541(z-0.9943)}{(z-1)}$	5.0	-	19.3	0.2744	15.6	0.0667	2.2735
55	$\frac{0.766712(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9880)}$	15.6	Com	PI	$\frac{0.018351(z-0.9937)}{(z-1)}$	8.5	2.14	14.7	0.2281	13.4	0.0554	2.2469
65	$\frac{0.994647(z-1)}{(z-0.9915)(z-0.9840)}$	12.6	Com	PI	$\frac{0.018966(z-0.9923)}{(z-1)}$	9.3	4.85	11.4	0.1770	10.4	0.0432	2.2738
75	$\frac{1.425976(z-1)}{(z-0.9892)(z-0.9780)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.018693(z-0.9901)}{(z-1)}$	8.7	8.70	10.5	0.1429	8.1	0.0349	2.3800
85	$\frac{2.934751(z-1)}{(z-0.9839)(z-0.9630)}$	6.3	Com	PI	$\frac{0.016755(z-0.9856)}{(z-1)}$	7.6	15.69	10.3	0.1199	8.0	0.0293	2.6334

Tabela 97 – PI com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MA.

Redução	$Q_d(z)$	t_s	$L(z)$	Classe	Controlador	t_s	Overshoot	t_s	$J_{v_{in}}$	t_s	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
t_s (%)		$Q_d(z)$ (ms)			VDFT	(ms)	(%)	V_{in} (ms)		Carga (ms)		
5	$\frac{0.425774(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9940)}$	25.7	Sem	PI	$\frac{0.016955(z-0.9961)}{(z-1)}$	11.0	-	28.10	0.4185	27.0	0.1018	2.4144
15	$\frac{0.432587(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)}$	24.0	Sem	PI	$\frac{0.019092(z-0.9959)}{(z-1)}$	9.0	-	26.4	0.3294	25.5	0.0800	2.2712
25	$\frac{0.432587(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)}$	24.0	Sem	PI	$\frac{0.019092(z-0.9959)}{(z-1)}$	9.0	-	26.4	0.3294	25.5	0.0800	2.2712
35	$\frac{0.446431(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9910)}$	21.7	Sem	PI	$\frac{0.023157(z-0.9957)}{(z-1)}$	6.3	-	24.0	0.2222	23.5	0.0538	2.1262
45	$\frac{0.453432(z-1)}{(z-0.9949)(z-0.9900)}$	20.9	Sem	PI	$\frac{0.025092(z-0.9956)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.467547(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9880)}$	19.5	Sem	PI	$\frac{0.028780(z-0.9954)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.496098(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9840)}$	17.6	Sem	PI	$\frac{0.035502(z-0.9950)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.539429(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9780)}$	15.6	Sem	PI	$\frac{0.044215(z-0.9944)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.649234(z-1)}{(z-0.9928)(z-0.9630)}$	12.4	Sem	PI	$\frac{0.060809(z-0.9932)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 98 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MA.

Redução	$Q_d(z)$	t_s	$L(z)$	Classe	Controlador	t_s	Overshoot	t_s	$J_{v_{in}}$	t_s	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
t_s (%)		$Q_d(z)$ (ms)			VDFT	(ms)	(%)	V_{in} (ms)		Carga (ms)		
5	$\frac{0.582581(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9940)}$	24.1	Com	PI	$\frac{0.011718(z-0.9952)}{(z-1)}$	9.7	-	24.9	0.6281	24.0	0.1285	2.8869
15	$\frac{0.620392(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	21.9	Com	PI	$\frac{0.012741(z-0.9949)}{(z-1)}$	8.0	-	23.5	0.5169	23.9	0.1010	2.6774
25	$\frac{0.620392(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)}$	21.9	Com	PI	$\frac{0.012741(z-0.9949)}{(z-1)}$	8.0	-	23.5	0.5169	23.9	0.1010	2.6774
35	$\frac{0.706652(z-1)}{(z-0.9938)(z-0.9910)}$	18.8	Com	PI	$\frac{0.014269(z-0.9943)}{(z-1)}$	5.9	1.24	19.5	0.3833	22.0	0.0680	2.4569
45	$\frac{0.755102(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9900)}$	17.6	Com	PI	$\frac{0.014819(z-0.9939)}{(z-1)}$	5.2	1.70	16.2	0.3411	21.3	0.0575	2.4010
55	$\frac{0.862550(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9880)}$	15.6	Com	PI	$\frac{0.015587(z-0.9933)}{(z-1)}$	10.1	2.93	14.0	0.2823	20.0	0.0430	2.3461
65	$\frac{1.118978(z-1)}{(z-0.9915)(z-0.9840)}$	12.6	Com	PI	$\frac{0.016231(z-0.9918)}{(z-1)}$	10.1	5.76	13.6	0.2185	15.7	0.0272	2.3413
75	$\frac{1.604223(z-1)}{(z-0.9892)(z-0.9780)}$	9.7	Com	PI	$\frac{0.016141(z-0.9896)}{(z-1)}$	9.2	9.60	12.1	0.1747	14.8	0.0164	2.4304
85	$\frac{3.301594(z-1)}{(z-0.9839)(z-0.9630)}$	6.3	Com	PI	$\frac{0.014751(z-0.9851)}{(z-1)}$	7.9	16.48	11.1	0.1434	14.0	0.0074	2.6709

Tabela 99 – PI com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.478995(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9940)}$	25.7	Sem	PI	$\frac{0.014115(z-0.9958)}{(z-1)}$	10.8	-	27.2	0.5278	25.8	0.1285	2.6378
15	$\frac{0.486661(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)}$	24.0	Sem	PI	$\frac{0.016023(z-0.9957)}{(z-1)}$	9.0	-	25.6	0.4159	24.5	0.1010	2.4357
25	$\frac{0.486661(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9930)}$	24.0	Sem	PI	$\frac{0.016023(z-0.9957)}{(z-1)}$	9.0	-	25.6	0.4159	24.5	0.1010	2.4357
35	$\frac{0.502235(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9910)}$	21.7	Sem	PI	$\frac{0.019650(z-0.9954)}{(z-1)}$	6.7	-	23.5	0.2801	22.8	0.0680	2.2209
45	$\frac{0.510111(z-1)}{(z-0.9949)(z-0.9900)}$	20.9	Sem	PI	$\frac{0.021376(z-0.9953)}{(z-1)}$	5.3	-	22.7	0.2373	22.1	0.0575	2.1650
55	$\frac{0.525990(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9880)}$	19.5	Sem	PI	$\frac{0.024665(z-0.9952)}{(z-1)}$	4.5	-	21.5	0.1776	21.1	0.0430	2.1031
65	$\frac{0.558110(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9840)}$	17.6	Sem	PI	$\frac{0.030660(z-0.9948)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.606858(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9780)}$	15.6	Sem	PI	$\frac{0.038429(z-0.9943)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.730388(z-1)}{(z-0.9928)(z-0.9630)}$	12.4	Sem	PI	$\frac{0.053228(z-0.9931)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 100 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.018029(z-1)}{(z+0.4314)(z-0.9941)(z-0.9936)(z-0.9768)}$	23.4	Com	PID	$\frac{1.089925(z-0.9925)(z-0.9925)}{z(z-1)}$	13.7	-	26.0	0.4087	25.3	0.0993	2.1634
15	$\frac{0.019514(z-1)}{(z+0.4011)(z-0.9936)(z-0.9935)(z-0.9746)}$	22.2	Com	PID	$\frac{1.046350(z-0.9917)(z-0.9917)}{z(z-1)}$	12.5	-	25.0	0.3612	24.3	0.0878	2.1183
25	$\frac{0.021141(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)(z+0.3783)}$	21.2	Com	PID	$\frac{1.002847(z-0.9910)(z-0.9910)}{z(z-1)}$	11.5	-	24.0	0.3232	23.5	0.0785	2.0865
35	$\frac{0.022905(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9925)(z-0.9702)(z+0.3608)}$	20.3	Com	PID	$\frac{0.959608(z-0.9923)(z-0.9880)}{z(z-1)}$	10.6	-	23.2	0.2923	22.7	0.0710	2.0657
45	$\frac{0.024802(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9919)(z-0.9681)(z+0.3471)}$	19.5	Com	PID	$\frac{0.916856(z-0.9926)(z-0.9859)}{z(z-1)}$	9.7	-	22.5	0.2669	22.1	0.0648	2.0519
55	$\frac{0.026828(z-1)}{(z-0.9933)(z-0.9914)(z-0.9659)(z+0.3361)}$	18.8	Com	PID	$\frac{0.874811(z-0.9928)(z-0.9840)}{z(z-1)}$	8.9	-	21.8	0.2455	21.5	0.0596	2.0438
65	$\frac{0.028985(z-1)}{(z-0.9932)(z-0.9908)(z-0.9638)(z+0.3271)}$	18.2	Com	PID	$\frac{0.833670(z-0.9929)(z-0.9820)}{z(z-1)}$	7.9	-	21.3	0.2273	20.9	0.0552	2.0400
75	$\frac{0.031271(z-1)}{(z-0.9931)(z-0.9903)(z-0.9616)(z+0.3196)}$	17.6	Com	PID	$\frac{0.793603(z-0.9929)(z-0.9800)}{z(z-1)}$	7.2	-	20.7	0.2118	20.4	0.0514	2.0392
85	$\frac{0.033689(z-1)}{(z-0.9930)(z-0.9897)(z-0.9594)(z+0.3132)}$	17.1	Com	PID	$\frac{0.754747(z-0.9929)(z-0.9780)}{z(z-1)}$	6.5	-	20.2	0.1985	19.8	0.0482	2.0408

Tabela 101 – PID com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.014302(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)(z+0.3157)}$	24.7	Sem	PID	$\frac{1.572057(z-0.9941)(z-0.9941)}{z(z-1)}$	15.8	-	27.6	0.3677	27.1	0.0892	2.0492
15	$\frac{0.015373(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9936)(z-0.9746)(z+0.3039)}$	23.7	Sem	PID	$\frac{1.572917(z-0.9937)(z-0.9937)}{z(z-1)}$	14.8	-	26.6	0.3202	26.2	0.0776	2.0156
25	$\frac{0.016480(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z-0.9724)(z+0.2948)}$	22.9	Sem	PID	$\frac{1.573524(z-0.9933)(z-0.9933)}{z(z-1)}$	13.8	-	25.8	0.2817	25.5	0.0682	1.9950
35	$\frac{0.017624(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9925)(z-0.9702)(z+0.2881)}$	22.2	Sem	PID	$\frac{1.573834(z-0.9929)(z-0.9929)}{z(z-1)}$	13.1	-	25.1	0.2503	24.9	0.0606	1.9840
45	$\frac{0.018804(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9919)(z-0.9681)(z+0.2835)}$	21.7	Sem	PID	$\frac{1.573831(z-0.9925)(z-0.9925)}{z(z-1)}$	12.3	-	24.5	0.2238	24.4	0.0542	1.9802
55	$\frac{0.020022(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9914)(z-0.9659)(z+0.2805)}$	21.2	Sem	PID	$\frac{1.573514(z-0.9921)(z-0.9921)}{z(z-1)}$	11.6	-	24.0	0.2018	23.9	0.0488	1.9815
65	$\frac{0.021274(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9908)(z-0.9638)(z+0.2789)}$	20.7	Sem	PID	$\frac{1.572893(z-0.9917)(z-0.9917)}{z(z-1)}$	10.9	2.03	23.5	0.1831	23.4	0.0443	1.9870
75	$\frac{0.022561(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9914)(z-0.9616)(z+0.2784)}$	20.3	Sem	PID	$\frac{1.571980(z-0.9913)(z-0.9913)}{z(z-1)}$	10.3	3.61	23.0	0.1671	23.0	0.0404	1.9955
85	$\frac{0.023881(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9897)(z-0.9594)(z+0.2788)}$	20.0	Sem	PID	$\frac{1.570793(z-0.9914)(z-0.9894)}{z(z-1)}$	9.7	5.08	22.7	0.1530	22.7	0.0370	2.0061

Tabela 102 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.021034(z-1)}{(z+0.4314)(z-0.9941)(z-0.9936)(z-0.9768)}$	23.4	Com	PID	$\frac{0.685571(z-0.9913)(z-0.9898)}{z(z-1)}$	12.4	-	25.4	0.5544	24.1	0.1349	2.4854
15	$\frac{0.022766(z-1)}{(z+0.4011)(z-0.9936)(z-0.9935)(z-0.9746)}$	22.2	Com	PID	$\frac{0.652083(z-0.9926)(z-0.9864)}{z(z-1)}$	11.2	-	24.3	0.4897	23.2	0.1192	2.3935
25	$\frac{0.024665(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)(z+0.3783)}$	21.2	Com	PID	$\frac{0.618720(z-0.9930)(z-0.9837)}{z(z-1)}$	10.1	-	23.4	0.4380	22.4	0.1065	2.3253
35	$\frac{0.026723(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9925)(z-0.9702)(z+0.3608)}$	20.3	Com	PID	$\frac{0.585627(z-0.9931)(z-0.9810)}{z(z-1)}$	9.2	-	23.4	0.3958	21.6	0.0963	2.2736
45	$\frac{0.028935(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9919)(z-0.9681)(z+0.3471)}$	19.5	Com	PID	$\frac{0.552983(z-0.9932)(z-0.9782)}{z(z-1)}$	8.3	-	22.0	0.3608	20.9	0.0878	2.2354
55	$\frac{0.031300(z-1)}{(z-0.9933)(z-0.9914)(z-0.9659)(z+0.3361)}$	18.8	Com	PID	$\frac{0.520965(z-0.9933)(z-0.9753)}{z(z-1)}$	7.5	-	21.3	0.3316	20.2	0.0807	2.2068
65	$\frac{0.033815(z-1)}{(z-0.9932)(z-0.9908)(z-0.9638)(z+0.3271)}$	18.2	Com	PID	$\frac{0.489734(z-0.9933)(z-0.9722)}{z(z-1)}$	6.8	-	20.8	0.3069	19.4	0.0747	2.1860
75	$\frac{0.036483(z-1)}{(z-0.9931)(z-0.9903)(z-0.9616)(z+0.3196)}$	17.6	Com	PID	$\frac{0.459426(z-0.9933)(z-0.9689)}{z(z-1)}$	6.2	-	20.2	0.2857	16.4	0.0695	2.1714
85	$\frac{0.039304(z-1)}{(z-0.9930)(z-0.9897)(z-0.9594)(z+0.3132)}$	17.1	Com	PID	$\frac{0.430153(z-0.9932)(z-0.9653)}{z(z-1)}$	5.6	-	19.5	0.2677	15.8	0.0651	2.1608

Tabela 103 – PID com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.01685z(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)(z+0.3157)}$	24.7	Sem	PID	$\frac{1.12612(z-0.9934)(z-0.9934)}{z(z-1)}$	14.9	-	27.0	0.4997	26.2	0.1215	2.2791
15	$\frac{0.017835z(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9936)(z-0.9746)(z+0.3039)}$	23.7	Sem	PID	$\frac{1.116821(z-0.9929)(z-0.9929)}{z(z-1)}$	14.0	-	26.2	0.4350	25.5	0.1057	2.1920
25	$\frac{0.019226z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z-0.9724)(z+0.2948)}$	22.9	Sem	PID	$\frac{1.120771(z-0.9925)(z-0.9925)}{z(z-1)}$	13.3	-	25.5	0.3822	24.8	0.0929	2.1277
35	$\frac{0.020561z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9925)(z-0.9702)(z+0.2881)}$	22.2	Sem	PID	$\frac{1.124417(z-0.9920)(z-0.9920)}{z(z-1)}$	12.6	-	24.8	0.3393	24.3	0.0824	2.0812
45	$\frac{0.021939z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9919)(z-0.9681)(z+0.2835)}$	21.7	Sem	PID	$\frac{1.127739(z-0.9915)(z-0.9915)}{z(z-1)}$	12.0	-	24.3	0.3036	23.8	0.0737	2.0464
55	$\frac{0.023359z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9914)(z-0.9659)(z+0.2805)}$	21.2	Sem	PID	$\frac{1.130734(z-0.9911)(z-0.9911)}{z(z-1)}$	13.7	-	23.8	0.2734	23.4	0.0664	2.0223
65	$\frac{0.024820z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9908)(z-0.9638)(z+0.2789)}$	20.7	Sem	PID	$\frac{1.133407(z-0.9922)(z-0.9891)}{z(z-1)}$	10.9	-	23.3	0.2480	23.0	0.0602	2.0056
75	$\frac{0.026321z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9903)(z-0.9616)(z+0.2784)}$	20.3	Sem	PID	$\frac{1.135770(z-0.9926)(z-0.9878)}{z(z-1)}$	10.4	-	22.9	0.2260	22.7	0.0548	1.9944
85	$\frac{0.027862z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9897)(z-0.9594)(z+0.2788)}$	20.0	Sem	PID	$\frac{1.137835(z-0.9929)(z-0.9867)}{z(z-1)}$	9.9	-	22.6	0.2072	22.3	0.0502	1.9881

Tabela 104 – PID sem filtro e $Q_d(z)$ _{30%} de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.024039z(z-1)}{(z+0.4314)(z-0.9941)(z-0.9636)(z-0.9768)}$	23.4	Com	PID	$\frac{0.382206(z-0.9931)(z-0.9708)}{z(z-1)}$	11.0	-	24.4	0.7222	22.3	0.1761	2.9214
15	$\frac{0.026018z(z-1)}{(z+0.4011)(z-0.9936)(z-0.9635)(z-0.9746)}$	22.2	Com	PID	$\frac{0.356383(z-0.9933)(z-0.9756)}{z(z-1)}$	9.9	-	23.4	0.6376	21.3	0.1554	2.7651
25	$\frac{0.028189z(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)(z+0.3783)}$	21.2	Com	PID	$\frac{0.330624(z-0.9933)(z-0.9711)}{z(z-1)}$	9.1	-	22.6	0.5699	20.4	0.1388	2.6471
35	$\frac{0.030540z(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9925)(z-0.9702)(z+0.3608)}$	20.3	Com	PID	$\frac{0.305141(z-0.9935)(z-0.9660)}{z(z-1)}$	8.2	-	21.8	0.5147	19.4	0.1253	2.5567
45	$\frac{0.033069z(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9919)(z-0.9681)(z+0.3471)}$	19.5	Com	PID	$\frac{0.280078(z-0.9935)(z-0.9604)}{z(z-1)}$	7.5	-	21.0	0.4692	17.9	0.1142	2.4865
55	$\frac{0.035771z(z-1)}{(z-0.9933)(z-0.9914)(z-0.9659)(z+0.3361)}$	18.8	Com	PID	$\frac{0.255580(z-0.9935)(z-0.9539)}{z(z-1)}$	6.9	-	20.3	0.4310	16.5	0.1049	2.4315
65	$\frac{0.038646z(z-1)}{(z-0.9932)(z-0.9908)(z-0.9638)(z+0.3271)}$	18.2	Com	PID	$\frac{0.231781(z-0.9935)(z-0.9464)}{z(z-1)}$	6.4	-	19.6	0.3986	15.9	0.0970	2.3886
75	$\frac{0.041695z(z-1)}{(z-0.9931)(z-0.9903)(z-0.9616)(z+0.3196)}$	17.6	Com	PID	$\frac{0.208793(z-0.9935)(z-0.9378)}{z(z-1)}$	5.9	-	18.7	0.3708	15.4	0.0902	2.3547
85	$\frac{0.044919z(z-1)}{(z-0.9930)(z-0.9897)(z-0.9594)(z+0.3132)}$	17.1	Com	PID	$\frac{0.186707(z-0.9934)(z-0.9276)}{z(z-1)}$	5.5	-	16.4	0.3472	14.8	0.0844	2.3287

Tabela 105 – PID com filtro e $Q_d(z)$ _{20%} de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.019699z(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)(z+0.3157)}$	24.7	Sem	PID	$\frac{0.768028(z-0.9924)(z-0.9924)}{z(z-1)}$	13.8	-	26.3	0.6532	24.8	0.1592	2.6308
15	$\frac{0.020497z(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9936)(z-0.9746)(z+0.3039)}$	23.7	Sem	PID	$\frac{0.774748(z-0.9918)(z-0.9918)}{z(z-1)}$	12.9	-	25.5	0.5682	24.3	0.1384	2.4846
25	$\frac{0.021973z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z-0.9724)(z+0.2948)}$	22.9	Sem	PID	$\frac{0.781206(z-0.9912)(z-0.9912)}{z(z-1)}$	12.1	-	24.8	0.4997	23.8	0.1216	2.3739
35	$\frac{0.023498z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9925)(z-0.9702)(z+0.2881)}$	22.2	Sem	PID	$\frac{0.787353(z-0.9907)(z-0.9907)}{z(z-1)}$	11.5	-	24.3	0.4435	23.4	0.1078	2.2877
45	$\frac{0.025073z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9919)(z-0.9681)(z+0.2835)}$	21.7	Sem	PID	$\frac{0.793169(z-0.9919)(z-0.9883)}{z(z-1)}$	11.0	-	23.8	0.3965	23.0	0.0964	2.2210
55	$\frac{0.026695z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9914)(z-0.9659)(z+0.2805)}$	21.2	Sem	PID	$\frac{0.798648(z-0.9925)(z-0.9867)}{z(z-1)}$	10.4	-	23.3	0.3571	22.6	0.0868	2.1690
65	$\frac{0.028365z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9908)(z-0.9638)(z+0.2789)}$	20.7	Sem	PID	$\frac{0.803793(z-0.9928)(z-0.9854)}{z(z-1)}$	10.0	-	23.0	0.3236	22.3	0.0786	2.1281
75	$\frac{0.030081z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9903)(z-0.9616)(z+0.2784)}$	20.3	Sem	PID	$\frac{0.808612(z-0.9930)(z-0.9842)}{z(z-1)}$	9.6	-	22.6	0.2948	22.0	0.0717	2.0964
85	$\frac{0.031842z(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9897)(z-0.9594)(z+0.2788)}$	20.0	Sem	PID	$\frac{0.813116(z-0.9931)(z-0.9831)}{z(z-1)}$	9.2	-	22.3	0.2700	21.8	0.0656	2.0719

Tabela 106 – PID sem filtro e $Q_d(z)$ _{20%} de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.027043z(z-1)}{(z+0.4314)(z-0.9941)(z-0.9768)(z-0.9936)}$	23.4	Com	PID	$\frac{0.146433(z-0.9936)(z-0.9495)}{z(z-1)}$	10.4	-	23.2	0.9123	20.5	0.2230	3.5138
15	$\frac{0.029271z(z-1)}{(z+0.4011)(z-0.9936)(z-0.9746)(z-0.9935)}$	22.2	Com	PID	$\frac{0.126394(z-0.9937)(z-0.9352)}{z(z-1)}$	9.5	-	22.1	0.8056	19.4	0.1966	3.2842
25	$\frac{0.031712z(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z+0.3783)(z-0.9724)}$	21.2	Com	PID	$\frac{0.106550(z-0.9937)(z-0.9163)}{z(z-1)}$	8.7	-	21.2	0.7189	18.4	0.1755	3.0861
35	$\frac{0.034358z(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9925)(z+0.3608)(z-0.9702)}$	20.3	Com	PID	$\frac{0.086985(z-0.9938)(z-0.8896)}{z(z-1)}$	8.0	-	20.4	0.6490	17.3	0.1583	2.9360
45	$\frac{0.037202z(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9919)(z+0.3471)(z-0.9681)}$	19.5	Com	PID	$\frac{0.067818(z-0.9938)(z-0.8490)}{z(z-1)}$	7.5	1.24	19.6	0.5904	16.5	0.1441	2.8157
55	$\frac{0.040242z(z-1)}{(z-0.9933)(z-0.9914)(z+0.3361)(z-0.9659)}$	18.8	Com	PID	$\frac{0.049170(z-0.9937)(z-0.7796)}{z(z-1)}$	7.0	1.47	18.1	0.5420	15.9	0.1322	2.7284
65	$\frac{0.043477z(z-1)}{(z-0.9932)(z-0.9908)(z+0.3271)(z-0.9638)}$	18.2	Com	PID	$\frac{0.031151(z-0.9937)(z-0.6345)}{z(z-1)}$	6.5	1.70	16.7	0.5016	15.3	0.1221	2.6648
75	$\frac{0.046907z(z-1)}{(z-0.9931)(z-0.9903)(z+0.3196)(z-0.9616)}$	17.6	Com	PID	$\frac{0.013856(z-0.9936)(z-0.4415)}{z(z-1)}$	11.7	2.14	16.2	0.4665	14.9	0.1135	2.6471
85	$\frac{0.050534z(z-1)}{(z-0.9930)(z-0.9897)(z+0.3132)(z-0.9594)}$	17.1	Com	PID	$\frac{-0.002640(z-5.8583)(z-0.9936)}{z(z-1)}$	11.9	2.48	15.5	0.4364	14.4	0.1062	2.6415

Tabela 107 – PID com filtro e $Q_d(z)$ _{10%} de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador		t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
					VDFT	VDFT							
5	$\frac{0.021452(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)(z+0.3157)}$	24.7	Sem	PID	0.500019	0.9905	12.2	-	25.3	0.8297	23.1	0.2024	3.0979
15	$\frac{0.023055(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9936)(z-0.9746)(z+0.3039)}$	23.7	Sem	PID	0.508692	0.9898	11.5	-	24.6	0.7207	22.6	0.1758	2.8697
25	$\frac{0.024719(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z-0.9724)(z+0.2948)}$	22.9	Sem	PID	0.517099	0.9918	10.8	-	24.0	0.6334	22.2	0.1544	2.6975
35	$\frac{0.026435(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9925)(z-0.9702)(z+0.2881)}$	22.2	Sem	PID	0.525193	0.9924	10.3	-	23.5	0.5618	21.9	0.1369	2.5631
45	$\frac{0.028207(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9919)(z-0.9681)(z+0.2835)}$	21.7	Sem	PID	0.532949	0.9927	9.6	-	23.1	0.5025	21.6	0.1223	2.4580
55	$\frac{0.030032(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9914)(z-0.9659)(z+0.2805)}$	21.2	Sem	PID	0.540359	0.9929	9.3	-	22.7	0.4526	21.4	0.1101	2.3746
65	$\frac{0.031911(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9908)(z-0.9638)(z+0.2789)}$	20.7	Sem	PID	0.547426	0.9931	8.7	-	22.4	0.4101	21.2	0.0997	2.3074
75	$\frac{0.033841(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9903)(z-0.9616)(z+0.2784)}$	20.3	Sem	PID	0.554155	0.9932	8.3	-	22.1	0.3733	21.0	0.0908	2.2526
85	$\frac{0.035822(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9897)(z-0.9594)(z+0.2788)}$	20.0	Sem	PID	0.560558	0.9933	8.0	-	21.8	0.3420	20.8	0.0832	2.2087

Tabela 108 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador		t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
					VDFT	VDFT							
5	$\frac{0.012626(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9936)(z-0.9768)}$	23.4	Com	PI	0.016304	0.9960	10.7	-	27.8	0.4382	26.6	0.1067	2.4554
15	$\frac{0.013961(z-1)}{(z-0.9936)(z-0.9935)(z-0.9746)}$	22.2	Com	PI	0.017211	0.9959	9.5	-	26.5	0.3862	25.4	0.0939	2.3713
25	$\frac{0.015376(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	21.2	Com	PI	0.018054	0.9957	8.4	-	25.3	0.3445	24.4	0.0837	2.3081
35	$\frac{0.016874(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	20.3	Com	PI	0.018832	0.9956	7.5	-	24.4	0.3105	23.5	0.0754	2.2601
45	$\frac{0.018458(z-1)}{(z-0.9933)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	19.5	Com	PI	0.019547	0.9954	6.7	-	23.5	0.2826	22.8	0.0686	2.2247
55	$\frac{0.020131(z-1)}{(z-0.9932)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	18.8	Com	PI	0.020202	0.9953	6.0	-	22.7	0.2592	22.0	0.0629	2.1980
65	$\frac{0.021898(z-1)}{(z-0.9931)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	18.2	Com	PI	0.020799	0.9952	5.5	-	22.1	0.2393	21.4	0.0581	2.1781
75	$\frac{0.023761(z-1)}{(z-0.9930)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	17.6	Com	PI	0.021342	0.9950	5.0	-	21.4	0.2226	20.8	0.0540	2.1636
85	$\frac{0.025725(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	17.0	Com	PI	0.021833	0.9949	4.6	-	20.9	0.2080	20.2	0.0505	2.1535

Tabela 109 – PI com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador		t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
					VDFT	VDFT							
5	$\frac{0.010887(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)}$	24.7	Sem	PI	0.018525	0.9963	11.7	-	29.3	0.3825	28.3	0.0931	2.3375
15	$\frac{0.011808(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9936)(z-0.9746)}$	23.7	Sem	PI	0.019849	0.9962	10.4	-	28.1	0.3315	27.3	0.0806	2.2582
25	$\frac{0.012746(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	22.9	Sem	PI	0.021152	0.9961	9.5	-	27.2	0.2909	26.4	0.0706	2.1985
35	$\frac{0.013702(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	22.2	Sem	PI	0.022434	0.9961	8.6	-	26.3	0.2576	25.7	0.0624	2.1539
45	$\frac{0.014673(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	21.7	Sem	PI	0.023695	0.9960	7.7	-	25.7	0.2301	25.1	0.0557	2.1196
55	$\frac{0.015659(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	21.2	Sem	PI	0.024934	0.9959	6.9	-	25.0	0.2070	24.5	0.0501	2.0939
65	$\frac{0.016660(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	20.7	Sem	PI	0.026153	0.9959	6.2	-	24.5	0.1874	24.1	0.0453	2.0748
75	$\frac{0.017675(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	20.3	Sem	PI	0.027351	0.9958	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.018704(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	20.0	Sem	PI	0.028528	0.9957	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 110 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador		t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
					VDFT	VDFT							
5	$\frac{0.014730(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9936)(z-0.9768)}$	23.4	Com	PI	0.012867	0.9955	10.4	-	26.3	0.5849	24.8	0.1422	2.7664
15	$\frac{0.016288(z-1)}{(z-0.9936)(z-0.9935)(z-0.9746)}$	22.2	Com	PI	0.013661	0.9954	9.3	-	25.2	0.5145	23.7	0.1251	2.6356
25	$\frac{0.017939(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	21.2	Com	PI	0.014399	0.9953	8.4	-	24.2	0.4586	22.8	0.1115	2.5364
35	$\frac{0.019686(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	20.3	Com	PI	0.015082	0.9952	7.6	-	23.3	0.4130	22.6	0.1005	2.4603
45	$\frac{0.021534(z-1)}{(z-0.9933)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	19.5	Com	PI	0.015710	0.9950	6.9	-	22.5	0.3757	21.1	0.0913	2.4005
55	$\frac{0.023486(z-1)}{(z-0.9932)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	18.8	Com	PI	0.016287	0.9949	6.4	-	21.8	0.3442	20.4	0.0837	2.3547
65	$\frac{0.025547(z-1)}{(z-0.9931)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	18.2	Com	PI	0.016814	0.9948	5.8	-	21.2	0.3179	19.5	0.0773	2.3184
75	$\frac{0.027721(z-1)}{(z-0.9930)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	17.6	Com	PI	0.017294	0.9946	5.3	-	20.5	0.2951	16.7	0.0718	2.2900
85	$\frac{0.030013(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	17.0	Com	PI	0.017730	0.9945	5.0	-	20.0	0.2756	16.1	0.0671	2.2680

Tabela 111 – PI com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.012701(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)}$	24.7	Sem	PI	$\frac{0.014653(z-0.9959)}{(z-1)}$	11.4	-	28.1	0.5175	26.8	0.1261	2.6058
15	$\frac{0.013776(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9936)(z-0.9746)}$	23.7	Sem	PI	$\frac{0.015793(z-0.9959)}{(z-1)}$	10.3	-	27.1	0.4489	26.0	0.1093	2.4822
25	$\frac{0.014871(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	22.9	Sem	PI	$\frac{0.016916(z-0.9958)}{(z-1)}$	9.4	-	26.3	0.3940	25.3	0.0958	2.3870
35	$\frac{0.015985(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	22.2	Sem	PI	$\frac{0.018019(z-0.9958)}{(z-1)}$	8.5	-	25.6	0.3489	24.7	0.0847	2.3132
45	$\frac{0.017118(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	21.7	Sem	PI	$\frac{0.019105(z-0.9957)}{(z-1)}$	7.9	-	24.9	0.3116	24.2	0.0756	2.2552
55	$\frac{0.018269(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	21.2	Sem	PI	$\frac{0.020172(z-0.9956)}{(z-1)}$	7.3	-	24.4	0.2802	23.7	0.0680	2.2096
65	$\frac{0.019436(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	20.7	Sem	PI	$\frac{0.021221(z-0.9956)}{(z-1)}$	6.6	-	23.9	0.2539	23.3	0.0615	2.1738
75	$\frac{0.020621(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	20.3	Sem	PI	$\frac{0.022252(z-0.9955)}{(z-1)}$	6.2	-	23.5	0.2310	22.9	0.0560	2.1453
85	$\frac{0.021822(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	20.0	Sem	PI	$\frac{0.023265(z-0.9955)}{(z-1)}$	5.8	-	23.1	0.2113	22.6	0.0512	2.1228

Tabela 112 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.016835(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9936)(z-0.9768)}$	23.4	Com	PI	$\frac{0.010290(z-0.9950)}{(z-1)}$	10.3	-	24.9	0.7468	22.7	0.1820	3.1693
15	$\frac{0.018615(z-1)}{(z-0.9936)(z-0.9935)(z-0.9746)}$	22.2	Com	PI	$\frac{0.010999(z-0.9949)}{(z-1)}$	9.2	-	23.9	0.6574	21.7	0.1602	2.9753
25	$\frac{0.020502(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	21.2	Com	PI	$\frac{0.011659(z-0.9948)}{(z-1)}$	8.4	-	22.9	0.5861	20.7	0.1427	2.8282
35	$\frac{0.022498(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	20.3	Com	PI	$\frac{0.012269(z-0.9947)}{(z-1)}$	7.7	-	22.1	0.5279	19.7	0.1285	2.7145
45	$\frac{0.024610(z-1)}{(z-0.9933)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	19.5	Com	PI	$\frac{0.012833(z-0.9945)}{(z-1)}$	7.0	-	21.3	0.4798	18.5	0.1168	2.6246
55	$\frac{0.026841(z-1)}{(z-0.9932)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	18.8	Com	PI	$\frac{0.013351(z-0.9944)}{(z-1)}$	6.6	-	20.5	0.4396	16.8	0.1070	2.5526
65	$\frac{0.029197(z-1)}{(z-0.9931)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	18.2	Com	PI	$\frac{0.013825(z-0.9943)}{(z-1)}$	6.0	1.13	19.8	0.4055	16.2	0.0987	2.4969
75	$\frac{0.031682(z-1)}{(z-0.9930)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	17.6	Com	PI	$\frac{0.014259(z-0.9942)}{(z-1)}$	5.7	1.35	18.9	0.3765	15.6	0.0917	2.4514
85	$\frac{0.034300(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	17.0	Com	PI	$\frac{0.014653(z-0.9940)}{(z-1)}$	5.4	1.58	16.6	0.3517	15.0	0.0856	2.4157

Tabela 113 – PI com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.014516(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)}$	24.7	Sem	PI	$\frac{0.011749(z-0.9955)}{(z-1)}$	11.0	-	26.8	0.6738	25.1	0.1640	2.9546
15	$\frac{0.015744(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9936)(z-0.9746)}$	23.7	Sem	PI	$\frac{0.012751(z-0.9955)}{(z-1)}$	10.1	-	26.1	0.5842	24.4	0.1422	2.7722
25	$\frac{0.016995(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	22.9	Sem	PI	$\frac{0.013738(z-0.9954)}{(z-1)}$	9.3	-	25.3	0.5127	23.9	0.1247	2.6304
35	$\frac{0.018269(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	22.2	Sem	PI	$\frac{0.014709(z-0.9954)}{(z-1)}$	8.6	-	24.7	0.4539	23.4	0.1104	2.5203
45	$\frac{0.019564(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	21.7	Sem	PI	$\frac{0.015663(z-0.9954)}{(z-1)}$	8.0	-	24.2	0.4053	23.0	0.0985	2.4336
55	$\frac{0.020879(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	21.2	Sem	PI	$\frac{0.016600(z-0.9953)}{(z-1)}$	7.5	-	23.7	0.3646	22.6	0.0886	2.3638
65	$\frac{0.022213(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	20.7	Sem	PI	$\frac{0.017522(z-0.9953)}{(z-1)}$	7.1	-	23.3	0.3300	22.3	0.0801	2.3078
75	$\frac{0.023567(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	20.3	Sem	PI	$\frac{0.018428(z-0.9953)}{(z-1)}$	6.5	-	22.9	0.3004	22.0	0.0729	2.2625
85	$\frac{0.024939(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	20.0	Sem	PI	$\frac{0.019318(z-0.9952)}{(z-1)}$	6.1	-	22.6	0.2748	21.8	0.0667	2.2255

Tabela 114 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.018939(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9936)(z-0.9768)}$	23.4	Com	PI	$\frac{0.008285(z-0.9944)}{(z-1)}$	10.1	-	23.3	0.9252	20.7	0.2261	3.6797
15	$\frac{0.020942(z-1)}{(z-0.9936)(z-0.9935)(z-0.9746)}$	22.2	Com	PI	$\frac{0.008928(z-0.9943)}{(z-1)}$	9.2	-	22.3	0.8150	19.6	0.1989	3.4256
25	$\frac{0.023064(z-1)}{(z-0.9935)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	21.2	Com	PI	$\frac{0.009527(z-0.9942)}{(z-1)}$	8.4	1.13	21.3	0.7258	18.6	0.1771	3.2101
35	$\frac{0.025311(z-1)}{(z-0.9934)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	20.3	Com	PI	$\frac{0.010082(z-0.9941)}{(z-1)}$	7.8	1.35	20.5	0.6534	17.4	0.1594	3.0398
45	$\frac{0.027686(z-1)}{(z-0.9933)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	19.5	Com	PI	$\frac{0.010594(z-0.9940)}{(z-1)}$	7.2	1.47	19.7	0.5935	16.5	0.1448	2.9060
55	$\frac{0.030196(z-1)}{(z-0.9932)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	18.8	Com	PI	$\frac{0.011067(z-0.9939)}{(z-1)}$	6.8	1.70	18.4	0.5439	15.9	0.1326	2.8020
65	$\frac{0.032846(z-1)}{(z-0.9931)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	18.2	Com	PI	$\frac{0.011500(z-0.9938)}{(z-1)}$	10.3	1.92	16.7	0.5025	15.4	0.1223	2.7204
75	$\frac{0.035642(z-1)}{(z-0.9930)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	17.6	Com	PI	$\frac{0.011898(z-0.9936)}{(z-1)}$	11.6	2.14	16.2	0.4663	14.8	0.1135	2.6532
85	$\frac{0.038588(z-1)}{(z-0.9929)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	17.0	Com	PI	$\frac{0.012260(z-0.9935)}{(z-1)}$	11.3	2.37	15.6	0.4357	14.3	0.1060	2.5988

Tabela 115 – PI com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 2 MA.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.016330(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)}$	24.7	Sem	PI	$\frac{0.009490(z-0.9950)}{(z-1)}$	11.0	-	25.6	0.8483	23.3	0.2069	3.4152
15	$\frac{0.017712(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9936)(z-0.9746)}$	23.7	Sem	PI	$\frac{0.010386(z-0.9950)}{(z-1)}$	10.1	-	24.9	0.7361	22.9	0.1794	3.1446
25	$\frac{0.019120(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	22.9	Sem	PI	$\frac{0.011267(z-0.9950)}{(z-1)}$	9.5	-	24.3	0.6458	22.2	0.1574	2.9403
35	$\frac{0.020553(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	22.2	Sem	PI	$\frac{0.012134(z-0.9950)}{(z-1)}$	8.7	-	23.7	0.5724	21.7	0.1393	2.7829
45	$\frac{0.022009(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	21.7	Sem	PI	$\frac{0.012985(z-0.9950)}{(z-1)}$	8.2	-	23.3	0.5113	21.4	0.1244	2.6584
55	$\frac{0.023488(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	21.2	Sem	PI	$\frac{0.013822(z-0.9950)}{(z-1)}$	7.6	-	22.9	0.4596	20.1	0.1118	2.5590
65	$\frac{0.024990(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	20.7	Sem	PI	$\frac{0.014645(z-0.9950)}{(z-1)}$	7.2	-	22.5	0.4162	20.9	0.1012	2.4776
75	$\frac{0.026513(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	20.3	Sem	PI	$\frac{0.015453(z-0.9949)}{(z-1)}$	6.8	-	22.2	0.3789	20.6	0.0921	2.4117
85	$\frac{0.028057(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	20.0	Sem	PI	$\frac{0.016247(z-0.9949)}{(z-1)}$	6.3	-	21.9	0.3465	20.5	0.0843	2.3578

Tabela 116 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 2 MA.

C.2 Dados coletados em malha fechada

- $k_p = 1.58 \times 10^{-3}$

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.118646z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9940)(z-0.6335)}$	26.1	Com	PID	$\frac{1.323186(z-0.9952)(z-0.9863)}{(z-1)}$	14.2	-	28.8	0.2462	28.3	0.0599	1.9817
15	$\frac{0.117122z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	24.6	Com	PID	$\frac{1.323884(z-0.9952)(z-0.9839)}{(z-1)}$	12.4	-	27.1	0.1930	26.8	0.0468	1.9710
25	$\frac{0.117122z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	24.6	Com	PID	$\frac{1.323884(z-0.9952)(z-0.9839)}{(z-1)}$	12.4	-	27.1	0.1930	26.8	0.0468	1.9710
35	$\frac{0.113590z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9910)(z-0.6517)}$	22.7	Com	PID	$\frac{1.329844(z-0.9952)(z-0.9794)}{(z-1)}$	12.4	5.98	24.9	0.1282	24.8	0.0309	2.0113
45	$\frac{0.11872z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)(z-0.6576)}$	22.0	Com	PID	$\frac{1.334157(z-0.9952)(z-0.9772)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.108841z(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9880)(z-0.6682)}$	21.1	Com	PID	$\frac{1.344227(z-0.9952)(z-0.9729)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.104617z(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9840)(z-0.6836)}$	19.9	Com	PID	$\frac{1.367301(z-0.9952)(z-0.9647)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.101822z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9780)(z-0.6953)}$	18.8	Com	PID	$\frac{1.403955(z-0.9951)(z-0.9532)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.103480z(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9630)(z-0.6978)}$	17.5	Com	PID	$\frac{1.484424(z-0.9950)(z-0.9272)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 117 – PID com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.095202z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)(z-0.7020)}$	26.2	Sem	PID	$\frac{1.374528(z-0.9952)(z-0.9867)}{(z-1)}$	14.5	-	29.0	0.2428	28.6	0.0590	1.9798
15	$\frac{0.098181z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)(z-0.6929)}$	24.8	Sem	PID	$\frac{1.381245(z-0.9953)(z-0.9845)}{(z-1)}$	12.6	-	27.3	0.1900	27.0	0.0460	1.9735
25	$\frac{0.098181z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)(z-0.6929)}$	24.8	Sem	PID	$\frac{1.381245(z-0.9953)(z-0.9845)}{(z-1)}$	12.6	-	27.3	0.1900	27.0	0.0460	1.9735
35	$\frac{0.101757z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9910)(z-0.6821)}$	22.9	Sem	PID	$\frac{1.395444(z-0.9953)(z-0.9801)}{(z-1)}$	9.2	7.22	25.2	0.1260	25.1	0.0304	2.0213
45	$\frac{0.102781z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)(z-0.6792)}$	22.3	Sem	PID	$\frac{1.403064(z-0.9953)(z-0.9780)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.103929z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9880)(z-0.6760)}$	21.4	Sem	PID	$\frac{1.419253(z-0.9953)(z-0.9739)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.104384z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9840)(z-0.6752)}$	20.4	Sem	PID	$\frac{1.454443(z-0.9953)(z-0.9660)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.103695z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9780)(z-0.6782)}$	19.5	Sem	PID	$\frac{1.511075(z-0.9953)(z-0.9551)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.102589z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9630)(z-0.6829)}$	18.5	Sem	PID	$\frac{1.656841(z-0.9953)(z-0.9312)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 118 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.138421z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9940)(z-0.6335)}$	26.1	Com	PID	$\frac{0.868991(z-0.9952)(z-0.9820)}{z(z-1)}$	13.9	-	28.3	0.3359	27.6	0.0818	2.1011
15	$\frac{0.136643z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	24.6	Com	PID	$\frac{0.869564(z-0.9952)(z-0.9790)}{z(z-1)}$	12.3	-	26.8	0.2627	26.3	0.0638	2.0285
25	$\frac{0.136643z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	24.6	Com	PID	$\frac{0.869564(z-0.9952)(z-0.9790)}{z(z-1)}$	12.3	-	26.8	0.2627	26.3	0.0638	2.0285
35	$\frac{0.132522z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9910)(z-0.6517)}$	22.7	Com	PID	$\frac{0.874569(z-0.9952)(z-0.9731)}{z(z-1)}$	9.9	-	24.8	0.1744	24.5	0.0422	1.9799
45	$\frac{0.130518z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)(z-0.6576)}$	22.0	Com	PID	$\frac{0.878237(z-0.9952)(z-0.9703)}{z(z-1)}$	8.6	-	24.1	0.1462	23.8	0.0353	1.9815
55	$\frac{0.126981z(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9880)(z-0.6682)}$	21.1	Com	PID	$\frac{0.886880(z-0.9952)(z-0.9648)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.122054z(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9840)(z-0.6836)}$	19.9	Com	PID	$\frac{0.906908(z-0.9952)(z-0.9543)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.118793z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9780)(z-0.6953)}$	18.8	Com	PID	$\frac{0.938958(z-0.9951)(z-0.9399)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.120727z(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9630)(z-0.6978)}$	17.5	Com	PID	$\frac{1.009502(z-0.9950)(z-0.9082)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 119 – PID com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.111069z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)(z-0.7020)}$	26.2	Sem	PID	$\frac{0.911276(z-0.9952)(z-0.9827)}{z(z-1)}$	14.1	-	28.6	0.3310	27.9	0.0806	2.0881
15	$\frac{0.114545z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)(z-0.6929)}$	24.8	Sem	PID	$\frac{0.917371(z-0.9953)(z-0.9799)}{z(z-1)}$	12.6	-	27.1	0.2587	26.6	0.0628	2.0184
25	$\frac{0.114545z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)(z-0.6929)}$	24.8	Sem	PID	$\frac{0.917371(z-0.9953)(z-0.9799)}{z(z-1)}$	12.6	-	27.1	0.2587	26.6	0.0628	2.0184
35	$\frac{0.118716z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9910)(z-0.6821)}$	22.9	Sem	PID	$\frac{0.930017(z-0.9953)(z-0.9744)}{z(z-1)}$	10.0	-	25.1	0.1713	24.8	0.0414	1.9757
45	$\frac{0.119912z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)(z-0.6792)}$	22.3	Sem	PID	$\frac{0.936740(z-0.9953)(z-0.9718)}{z(z-1)}$	8.8	-	24.4	0.1435	24.2	0.0347	1.9803
55	$\frac{0.121251z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9880)(z-0.6760)}$	21.4	Sem	PID	$\frac{0.950959(z-0.9953)(z-0.9666)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.121781z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9840)(z-0.6752)}$	20.4	Sem	PID	$\frac{0.981725(z-0.9953)(z-0.9568)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.120978z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9780)(z-0.6782)}$	19.5	Sem	PID	$\frac{1.031044(z-0.9953)(z-0.9435)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.119687z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9630)(z-0.6829)}$	18.5	Sem	PID	$\frac{1.157465(z-0.9953)(z-0.9156)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 120 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.158195z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9940)(z-0.6335)}$	26.1	Com	PID	$\frac{0.528344(z-0.9952)(z-0.9740)}{z(z-1)}$	13.1	-	27.8	0.4405	26.8	0.1073	2.3141
15	$\frac{0.156163z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	24.6	Com	PID	$\frac{0.528823(z-0.9952)(z-0.9697)}{z(z-1)}$	11.5	-	26.3	0.3444	25.6	0.0837	2.1784
25	$\frac{0.156163z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	24.6	Com	PID	$\frac{0.528823(z-0.9952)(z-0.9697)}{z(z-1)}$	11.5	-	26.3	0.3444	25.6	0.0837	2.1784
35	$\frac{0.151453z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9910)(z-0.6517)}$	22.7	Com	PID	$\frac{0.533113(z-0.9952)(z-0.9614)}{z(z-1)}$	9.2	-	24.5	0.2280	24.0	0.0553	2.0472
45	$\frac{0.149163z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)(z-0.6576)}$	22.0	Com	PID	$\frac{0.536296(z-0.9952)(z-0.9574)}{z(z-1)}$	8.3	-	23.8	0.1912	23.5	0.0462	2.0201
55	$\frac{0.145121z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9880)(z-0.6682)}$	21.1	Com	PID	$\frac{0.543869(z-0.9952)(z-0.9497)}{z(z-1)}$	6.7	-	22.9	0.1400	22.7	0.0338	2.0023
65	$\frac{0.139490z(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9840)(z-0.6836)}$	19.9	Com	PID	$\frac{0.561614(z-0.9952)(z-0.9354)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.135763z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9780)(z-0.6953)}$	18.8	Com	PID	$\frac{0.590210(z-0.9951)(z-0.9163)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.137974z(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9630)(z-0.6978)}$	17.5	Com	PID	$\frac{0.653310(z-0.9950)(z-0.8757)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 121 – PID com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.126936z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)(z-0.7020)}$	26.2	Sem	PID	$\frac{0.563837(z-0.9953)(z-0.9755)}{z(z-1)}$	13.3	-	28.6	0.4343	27.1	0.1058	2.2951
15	$\frac{0.130908z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)(z-0.6929)}$	24.8	Sem	PID	$\frac{0.569465(z-0.9953)(z-0.9716)}{z(z-1)}$	11.9	-	26.6	0.3390	25.9	0.0824	2.1619
25	$\frac{0.130908z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)(z-0.6929)}$	24.8	Sem	PID	$\frac{0.569465(z-0.9953)(z-0.9716)}{z(z-1)}$	11.9	-	26.6	0.3390	25.9	0.0824	2.1619
35	$\frac{0.135676z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9910)(z-0.6821)}$	22.9	Sem	PID	$\frac{0.580947(z-0.9953)(z-0.9641)}{z(z-1)}$	9.6	-	24.8	0.2241	25.9	0.0543	2.0357
45	$\frac{0.137042z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)(z-0.6792)}$	22.3	Sem	PID	$\frac{0.586997(z-0.9953)(z-0.9605)}{z(z-1)}$	8.7	-	24.2	0.1877	24.3	0.0454	2.0101
55	$\frac{0.138572z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9880)(z-0.6760)}$	21.4	Sem	PID	$\frac{0.599738(z-0.9953)(z-0.9536)}{z(z-1)}$	6.9	-	23.2	0.1374	23.8	0.0332	1.9964
65	$\frac{0.139178z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9840)(z-0.6752)}$	20.4	Sem	PID	$\frac{0.627186(z-0.9953)(z-0.9408)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.138290z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9780)(z-0.6782)}$	19.5	Sem	PID	$\frac{0.671021(z-0.9953)(z-0.9240)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.136786z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9630)(z-0.6829)}$	18.5	Sem	PID	$\frac{0.782933(z-0.9953)(z-0.8908)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 122 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.177969z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9940)(z-0.6335)}$	26.1	Com	PID	$\frac{0.263396(z-0.9952)(z-0.9536)}{z(z-1)}$	12.0	-	26.9	0.5613	25.6	0.1365	2.5926
15	$\frac{0.175683z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	24.6	Com	PID	$\frac{0.263803(z-0.9952)(z-0.9459)}{z(z-1)}$	10.5	-	25.7	0.4383	24.6	0.1065	2.3821
25	$\frac{0.175683z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9930)(z-0.6392)}$	24.6	Com	PID	$\frac{0.263803(z-0.9952)(z-0.9459)}{z(z-1)}$	10.5	-	25.7	0.4383	24.6	0.1065	2.3821
35	$\frac{0.170385z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9910)(z-0.6517)}$	22.7	Com	PID	$\frac{0.267536(z-0.9952)(z-0.9315)}{z(z-1)}$	8.3	-	24.1	0.2894	23.4	0.0702	2.1626
45	$\frac{0.167808z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)(z-0.6576)}$	22.0	Com	PID	$\frac{0.270342(z-0.9952)(z-0.9247)}{z(z-1)}$	7.3	-	23.5	0.2422	22.9	0.0587	2.1061
55	$\frac{0.163262z(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9880)(z-0.6682)}$	21.1	Com	PID	$\frac{0.277083(z-0.9952)(z-0.9121)}{z(z-1)}$	5.9	-	22.6	0.1774	22.3	0.0429	2.0473
65	$\frac{0.156926z(z-1)}{(z-0.9952)(z-0.9840)(z-0.6836)}$	19.9	Com	PID	$\frac{0.293052(z-0.9952)(z-0.8898)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.152733z(z-1)}{(z-0.9951)(z-0.9780)(z-0.6953)}$	18.8	Com	PID	$\frac{0.318961(z-0.9951)(z-0.8621)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.155221z(z-1)}{(z-0.9950)(z-0.9630)(z-0.6978)}$	17.5	Com	PID	$\frac{0.376272(z-0.9950)(z-0.8079)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 123 – PID com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.142803z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)(z-0.7020)}$	26.2	Sem	PID	$\frac{0.293607(z-0.9953)(z-0.9580)}{z(z-1)}$	12.3	-	27.3	0.5533	26.0	0.1347	2.5673
15	$\frac{0.142722z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)(z-0.6929)}$	24.8	Sem	PID	$\frac{0.298871(z-0.9953)(z-0.9518)}{z(z-1)}$	10.9	-	26.0	0.4316	25.0	0.1049	2.3602
25	$\frac{0.142722z(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)(z-0.6929)}$	24.8	Sem	PID	$\frac{0.298871(z-0.9953)(z-0.9518)}{z(z-1)}$	10.9	-	26.0	0.4316	25.0	0.1049	2.3602
35	$\frac{0.152635z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9910)(z-0.6821)}$	22.9	Sem	PID	$\frac{0.309448(z-0.9953)(z-0.9401)}{z(z-1)}$	8.7	-	24.4	0.2844	23.7	0.0690	2.1458
45	$\frac{0.154172z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)(z-0.6792)}$	22.3	Sem	PID	$\frac{0.314974(z-0.9953)(z-0.9345)}{z(z-1)}$	7.8	-	23.8	0.2380	23.3	0.0577	2.0916
55	$\frac{0.155894z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9880)(z-0.6760)}$	21.4	Sem	PID	$\frac{0.326567(z-0.9953)(z-0.9242)}{z(z-1)}$	6.4	-	23.0	0.1739	22.6	0.0421	2.0357
65	$\frac{0.156576z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9840)(z-0.6752)}$	20.4	Sem	PID	$\frac{0.351434(z-0.9953)(z-0.9061)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.155543z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9780)(z-0.6782)}$	19.5	Sem	PID	$\frac{0.391003(z-0.9953)(z-0.8841)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.153884z(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9630)(z-0.6829)}$	18.5	Sem	PID	$\frac{0.491631(z-0.9953)(z-0.8454)}{z(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 124 – PID sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.321059(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)}$	26.2	Com	PI	$\frac{0.024472(z-0.9967)}{(z-1)}$	12.0	-	30.9	0.2639	30.2	0.0641	2.1281
15	$\frac{0.321898(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.8	Com	PI	$\frac{0.027517(z-0.9966)}{(z-1)}$	9.8	-	29.0	0.2055	28.5	0.0497	2.0604
25	$\frac{0.321898(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.8	Com	PI	$\frac{0.027517(z-0.9966)}{(z-1)}$	9.8	-	29.0	0.2055	28.5	0.0497	2.0604
35	$\frac{0.323192(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9910)}$	22.9	Com	PI	$\frac{0.033598(z-0.9964)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
45	$\frac{0.323764(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)}$	22.3	Com	PI	$\frac{0.036628(z-0.9963)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.324869(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9880)}$	21.4	Com	PI	$\frac{0.042659(z-0.9961)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.327051(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9840)}$	20.3	Com	PI	$\frac{0.054596(z-0.9960)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.330221(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9780)}$	19.5	Com	PI	$\frac{0.072204(z-0.9958)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.337683(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9630)}$	18.5	Com	PI	$\frac{0.114830(z-0.9956)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 125 – PI com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.315925(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)}$	26.4	Sem	PI	$\frac{0.024947(z-0.9967)}{(z-1)}$	11.6	-	30.7	0.2546	30.1	0.0618	2.1157
15	$\frac{0.316304(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.9	Sem	PI	$\frac{0.028085(z-0.9966)}{(z-1)}$	9.5	-	28.8	0.1977	28.3	0.0478	2.0522
25	$\frac{0.316304(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.9	Sem	PI	$\frac{0.028085(z-0.9966)}{(z-1)}$	9.5	-	28.8	0.1977	28.3	0.0478	2.0522
35	$\frac{0.316913(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9910)}$	23.1	Sem	PI	$\frac{0.034352(z-0.9963)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
45	$\frac{0.317101(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9900)}$	22.5	Sem	PI	$\frac{0.037482(z-0.9963)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.317583(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9880)}$	21.6	Sem	PI	$\frac{0.043738(z-0.9961)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.318237(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9840)}$	20.6	Sem	PI	$\frac{0.056230(z-0.9960)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.318961(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9780)}$	19.7	Sem	PI	$\frac{0.074929(z-0.9958)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.320155(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9630)}$	18.7	Sem	PI	$\frac{0.121529(z-0.9956)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 126 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.374569(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)}$	26.2	Com	PI	$\frac{0.019741(z-0.9964)}{(z-1)}$	12.0	-	29.8	0.3542	28.9	0.0862	2.2834
15	$\frac{0.375548(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.8	Com	PI	$\frac{0.022354(z-0.9963)}{(z-1)}$	10.2	-	28.1	0.2763	27.4	0.0670	2.1675
25	$\frac{0.375548(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.8	Com	PI	$\frac{0.022354(z-0.9963)}{(z-1)}$	10.2	-	28.1	0.2763	27.4	0.0670	2.1675
35	$\frac{0.377058(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9910)}$	22.9	Com	PI	$\frac{0.027570(z-0.9961)}{(z-1)}$	7.2	-	25.9	0.1823	25.4	0.0441	2.0560
45	$\frac{0.377724(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)}$	22.3	Com	PI	$\frac{0.030168(z-0.9961)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.379014(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9880)}$	21.4	Com	PI	$\frac{0.035340(z-0.9960)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.381560(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9840)}$	20.3	Com	PI	$\frac{0.045574(z-0.9958)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.385258(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9780)}$	19.5	Com	PI	$\frac{0.060669(z-0.9957)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.393964(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9630)}$	18.5	Com	PI	$\frac{0.097211(z-0.9955)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 127 – PI com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.368579(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)}$	26.4	Sem	PI	$\frac{0.020128(z-0.9964)}{(z-1)}$	11.9	-	29.8	0.3437	28.9	0.0836	2.2653
15	$\frac{0.369022(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.9	Sem	PI	$\frac{0.022818(z-0.9963)}{(z-1)}$	10.0	-	28.0	0.2671	27.4	0.0648	2.1539
25	$\frac{0.369022(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.9	Sem	PI	$\frac{0.022818(z-0.9963)}{(z-1)}$	10.0	-	28.0	0.2671	27.4	0.0648	2.1539
35	$\frac{0.369731(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9910)}$	23.1	Sem	PI	$\frac{0.028191(z-0.9961)}{(z-1)}$	6.9	-	25.8	0.1755	25.4	0.0424	2.0491
45	$\frac{0.370021(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9900)}$	22.5	Sem	PI	$\frac{0.030875(z-0.9961)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.370513(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9880)}$	21.6	Sem	PI	$\frac{0.036237(z-0.9960)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.371277(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9840)}$	20.6	Sem	PI	$\frac{0.046946(z-0.9958)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.372121(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9780)}$	19.7	Sem	PI	$\frac{0.062975(z-0.9957)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.373514(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9630)}$	18.7	Sem	PI	$\frac{0.102920(z-0.9956)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 128 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.428079(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)}$	26.2	Com	PI	$\frac{0.016194(z-0.9961)}{(z-1)}$	11.7	-	28.7	0.4571	27.5	0.1114	2.4822
15	$\frac{0.429198(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.8	Com	PI	$\frac{0.018482(z-0.9960)}{(z-1)}$	9.9	-	27.2	0.3566	26.2	0.0867	2.3108
25	$\frac{0.429198(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.8	Com	PI	$\frac{0.018482(z-0.9960)}{(z-1)}$	9.9	-	27.2	0.3566	26.2	0.0867	2.3108
35	$\frac{0.430923(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9910)}$	22.9	Com	PI	$\frac{0.023049(z-0.9959)}{(z-1)}$	7.4	-	25.2	0.2356	24.6	0.0571	2.1325
45	$\frac{0.431685(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)}$	22.3	Com	PI	$\frac{0.025323(z-0.9958)}{(z-1)}$	6.4	-	24.5	0.1974	24.0	0.0477	2.0869
55	$\frac{0.433159(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9880)}$	21.4	Com	PI	$\frac{0.029850(z-0.9958)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.436068(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9840)}$	20.3	Com	PI	$\frac{0.038807(z-0.9957)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.440294(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9780)}$	19.5	Com	PI	$\frac{0.052018(z-0.9956)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.450244(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9630)}$	18.5	Com	PI	$\frac{0.083997(z-0.9955)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 129 – PI com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.421234(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)}$	26.4	Sem	PI	$\frac{0.016513(z-0.9962)}{(z-1)}$	11.7	-	28.8	0.4456	27.6	0.1085	2.4591
15	$\frac{0.421739(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.9	Sem	PI	$\frac{0.018868(z-0.9961)}{(z-1)}$	9.9	-	27.2	0.3466	26.3	7 0.0842	2.2922
25	$\frac{0.421739(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.9	Sem	PI	$\frac{0.018868(z-0.9961)}{(z-1)}$	9.9	-	27.2	0.3466	26.3	0.0842	2.2922
35	$\frac{0.422550(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9910)}$	23.1	Sem	PI	$\frac{0.023570(z-0.9959)}{(z-1)}$	7.4	-	25.3	0.2280	24.7	0.0552	2.1210
45	$\frac{0.422881(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9900)}$	22.5	Sem	PI	$\frac{0.025919(z-0.9959)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
55	$\frac{0.423444(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9880)}$	21.6	Sem	PI	$\frac{0.030612(z-0.9958)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.424316(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9840)}$	20.6	Sem	PI	$\frac{0.039984(z-0.9957)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.425281(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9780)}$	19.7	Sem	PI	$\frac{0.054010(z-0.9956)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.426873(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9630)}$	18.7	Sem	PI	$\frac{0.088963(z-0.9955)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 130 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.481589(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)}$	26.2	Com	PI	$\frac{0.013434(z-0.9958)}{(z-1)}$	11.2	-	27.5	0.5726	26.0	0.1395	2.7257
15	$\frac{0.482848(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.8	Com	PI	$\frac{0.015471(z-0.9957)}{(z-1)}$	9.6	-	26.2	0.4468	25.0	0.1087	2.4882
25	$\frac{0.482848(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.8	Com	PI	$\frac{0.015471(z-0.9957)}{(z-1)}$	9.6	-	26.2	0.4468	25.0	0.1087	2.4882
35	$\frac{0.484789(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9910)}$	22.9	Com	PI	$\frac{0.019532(z-0.9956)}{(z-1)}$	7.4	-	24.5	0.2952	23.7	0.0716	2.2335
45	$\frac{0.485646(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9900)}$	22.3	Com	PI	$\frac{0.021555(z-0.9956)}{(z-1)}$	6.6	-	23.9	0.2474	23.3	0.0599	2.1646
55	$\frac{0.487304(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9880)}$	21.4	Com	PI	$\frac{0.025580(z-0.9956)}{(z-1)}$	5.3	-	23.0	0.1814	22.6	0.0438	2.0849
65	$\frac{0.490577(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9840)}$	20.3	Com	PI	$\frac{0.033543(z-0.9955)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.495331(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9780)}$	19.5	Com	PI	$\frac{0.045289(z-0.9954)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.506525(z-1)}{(z-0.9953)(z-0.9630)}$	18.5	Com	PI	$\frac{0.073719(z-0.9954)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 131 – PI com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.473888(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9940)}$	26.4	Sem	PI	$\frac{0.013701(z-0.9958)}{(z-1)}$	11.3	-	27.7	0.5606	26.1	0.1366	2.6991
15	$\frac{0.474457(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.9	Sem	PI	$\frac{0.015795(z-0.9958)}{(z-1)}$	9.7	-	26.4	0.4365	25.2	0.1062	2.4665
25	$\frac{0.474457(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9930)}$	24.9	Sem	PI	$\frac{0.015795(z-0.9958)}{(z-1)}$	9.7	-	26.4	0.4365	25.2	0.1062	2.4665
35	$\frac{0.475369(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9910)}$	23.1	Sem	PI	$\frac{0.019976(z-0.9957)}{(z-1)}$	7.4	-	24.7	0.2872	24.9	0.0697	2.2181
45	$\frac{0.475741(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9900)}$	22.5	Sem	PI	$\frac{0.022065(z-0.9957)}{(z-1)}$	6.6	-	24.1	0.2402	24.5	0.0582	2.1517
55	$\frac{0.476374(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9880)}$	21.6	Sem	PI	$\frac{0.026237(z-0.9956)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
65	$\frac{0.477356(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9840)}$	20.6	Sem	PI	$\frac{0.034568(z-0.9955)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
75	$\frac{0.478441(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9780)}$	19.7	Sem	PI	$\frac{0.047037(z-0.9955)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.480232(z-1)}{(z-0.9954)(z-0.9630)}$	18.7	Sem	PI	$\frac{0.078108(z-0.9954)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 132 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 1 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.011783(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9938)(z-0.9768)}$	23.8	Com	PI	$\frac{0.016770(z-0.9961)}{(z-1)}$	11.0	-	28.1	0.4255	27.0	0.1035	2.4276
15	$\frac{0.012677(z-1)}{(z-0.9939)(z-0.9936)(z-0.9746)}$	22.8	Com	PI	$\frac{0.018094(z-0.9960)}{(z-1)}$	9.9	-	27.0	0.3663	26.1	0.0890	2.3294
25	$\frac{0.013572(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	22.0	Com	PI	$\frac{0.019427(z-0.9959)}{(z-1)}$	8.9	-	27.0	0.3188	26.1	0.0774	2.2547
35	$\frac{0.014468(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	21.4	Com	PI	$\frac{0.020766(z-0.9959)}{(z-1)}$	8.0	-	25.5	0.2802	24.7	0.0680	2.1981
45	$\frac{0.015365(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	20.9	Com	PI	$\frac{0.022108(z-0.9958)}{(z-1)}$	7.2	-	24.9	0.2481	24.3	0.0601	2.1541
55	$\frac{0.016261(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	20.4	Com	PI	$\frac{0.023450(z-0.9958)}{(z-1)}$	6.6	-	24.4	0.2214	23.8	0.0536	2.1209
65	$\frac{0.017158(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	20.0	Com	PI	$\frac{0.024793(z-0.9957)}{(z-1)}$	6.0	-	23.9	0.1988	23.4	0.0481	2.0955
75	$\frac{0.018056(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	19.7	Com	PI	$\frac{0.026135(z-0.9957)}{(z-1)}$	5.5	-	23.3	0.1795	23.1	0.0434	2.0763
85	$\frac{0.018953(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	19.4	Com	PI	$\frac{0.027475(z-0.9956)}{(z-1)}$	5.1	-	23.2	0.1629	22.8	0.0393	2.0627

Tabela 133 – PI com filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overshoot (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.011180(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)}$	24.7	Sem	PI	$\frac{0.017590(z-0.9963)}{(z-1)}$	12.1	-	29.5	0.4157	28.4	0.1012	2.3959
15	$\frac{0.012025(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9936)(z-0.9746)}$	23.8	Sem	PI	$\frac{0.018973(z-0.9962)}{(z-1)}$	10.9	-	28.4	0.3582	27.5	0.0871	2.3021
25	$\frac{0.012874(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	23.1	Sem	PI	$\frac{0.020358(z-0.9962)}{(z-1)}$	10.0	-	28.4	0.3124	26.1	0.0759	2.2313
35	$\frac{0.013726(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	22.5	Sem	PI	$\frac{0.021743(z-0.9961)}{(z-1)}$	9.0	-	26.8	0.2751	25.6	0.0667	2.1770
45	$\frac{0.014580(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	22.1	Sem	PI	$\frac{0.023128(z-0.9961)}{(z-1)}$	8.3	-	26.2	0.2442	25.2	0.0592	2.1350
55	$\frac{0.015434(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	21.7	Sem	PI	$\frac{0.024513(z-0.9960)}{(z-1)}$	7.5	-	25.7	0.2183	24.8	0.0528	2.1030
65	$\frac{0.016289(z-1)}{(z-0.9947)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	21.4	Sem	PI	$\frac{0.025897(z-0.9960)}{(z-1)}$	6.9	-	25.2	0.1964	24.4	0.0475	2.0783
75	$\frac{0.017143(z-1)}{(z-0.9947)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	21.1	Sem	PI	$\frac{0.027281(z-0.9960)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-
85	$\frac{0.017998(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	20.9	Sem	PI	$\frac{0.028664(z-0.9959)}{(z-1)}$	-	Satura	-	-	-	-	-

Tabela 134 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{40\%}$ de GR = 2 MF.

<i>Redução</i> t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	<i>Classe</i>	<i>Controlador</i> <i>VDFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s <i>Carga</i> (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.013747(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9938)(z-0.9768)}$	23.8	Com	PI	$\frac{0.013142(z-0.9956)}{(z-1)}$	10.3	-	26.7	0.5706	25.0	0.1388	2.7338
15	$\frac{0.014790(z-1)}{(z-0.9939)(z-0.9936)(z-0.9746)}$	22.8	Com	PI	$\frac{0.014279(z-0.9955)}{(z-1)}$	9.4	-	25.7	0.4909	24.3	0.1195	2.5821
25	$\frac{0.015834(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	22.0	Com	PI	$\frac{0.015423(z-0.9955)}{(z-1)}$	8.6	-	25.7	0.4276	24.3	0.1039	2.4662
35	$\frac{0.016880(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	21.4	Com	PI	$\frac{0.016572(z-0.9955)}{(z-1)}$	7.9	-	24.3	0.3756	23.3	0.0913	2.3759
45	$\frac{0.017926(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	20.9	Com	PI	$\frac{0.017723(z-0.9954)}{(z-1)}$	7.4	-	23.8	0.3327	22.9	0.0808	2.3049
55	$\frac{0.018972(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	20.4	Com	PI	$\frac{0.018874(z-0.9954)}{(z-1)}$	6.9	-	23.4	0.2970	22.6	0.0721	2.2488
65	$\frac{0.020018(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	20.0	Com	PI	$\frac{0.020026(z-0.9954)}{(z-1)}$	6.3	-	23.0	0.2667	22.4	0.0647	2.2046
75	$\frac{0.021065(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	19.7	Com	PI	$\frac{0.021176(z-0.9953)}{(z-1)}$	5.8	-	22.7	0.2409	22.1	0.0584	2.1698
85	$\frac{0.022111(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	19.4	Com	PI	$\frac{0.022325(z-0.9953)}{(z-1)}$	5.5	-	22.5	0.2186	21.9	0.0530	2.1421

Tabela 135 – PI com filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 2 MF.

<i>Redução</i> t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	<i>Classe</i>	<i>Controlador</i> <i>VDFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s <i>Carga</i> (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.013043(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)}$	24.7	Sem	PI	$\frac{0.013823(z-0.9959)}{(z-1)}$	11.5	-	28.1	0.5609	26.7	0.1367	2.6946
15	$\frac{0.014029(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9936)(z-0.9746)}$	23.8	Sem	PI	$\frac{0.015008(z-0.9958)}{(z-1)}$	10.4	-	27.2	0.4838	25.9	0.1178	2.5501
25	$\frac{0.015020(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	23.1	Sem	PI	$\frac{0.016195(z-0.9958)}{(z-1)}$	9.6	-	26.4	0.4222	25.3	0.1027	2.4387
35	$\frac{0.016014(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	22.5	Sem	PI	$\frac{0.017383(z-0.9958)}{(z-1)}$	8.9	-	25.8	0.3716	24.9	0.0904	2.3515
45	$\frac{0.017010(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	22.1	Sem	PI	$\frac{0.018571(z-0.9957)}{(z-1)}$	8.2	-	25.3	0.3301	24.5	0.0802	2.2830
55	$\frac{0.018006(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	21.7	Sem	PI	$\frac{0.019758(z-0.9957)}{(z-1)}$	7.7	-	24.9	0.2952	24.1	0.0716	2.2287
65	$\frac{0.019004(z-1)}{(z-0.9947)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	21.4	Sem	PI	$\frac{0.020945(z-0.9957)}{(z-1)}$	7.2	-	24.5	0.2658	23.9	0.0644	2.1852
75	$\frac{0.020001(z-1)}{(z-0.9947)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	21.1	Sem	PI	$\frac{0.022131(z-0.9957)}{(z-1)}$	6.7	-	24.2	0.2404	23.6	0.0582	2.1504
85	$\frac{0.020998(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	20.9	Sem	PI	$\frac{0.023317(z-0.9957)}{(z-1)}$	6.3	-	23.9	0.2187	23.4	0.0529	2.1228

Tabela 136 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{30\%}$ de GR = 2 MF.

<i>Redução</i> t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	<i>Classe</i>	<i>Controlador</i> <i>VDFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s <i>Carga</i> (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.015711(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9938)(z-0.9768)}$	23.8	Com	PI	$\frac{0.010422(z-0.9950)}{(z-1)}$	10.1	-	24.9	0.7331	22.7	0.1787	3.1372
15	$\frac{0.016903(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9746)}$	22.8	Com	PI	$\frac{0.011418(z-0.9950)}{(z-1)}$	9.4	-	24.2	0.6314	22.1	0.1539	2.9094
25	$\frac{0.018096(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	22.0	Com	PI	$\frac{0.012420(z-0.9950)}{(z-1)}$	8.5	-	24.2	0.5508	22.1	0.1340	2.7385
35	$\frac{0.019291(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	21.4	Com	PI	$\frac{0.013426(z-0.9950)}{(z-1)}$	7.9	-	23.1	0.4839	21.3	0.1177	2.6041
45	$\frac{0.020486(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	20.9	Com	PI	$\frac{0.014434(z-0.9950)}{(z-1)}$	7.3	-	22.7	0.4286	21.1	0.1043	2.4993
55	$\frac{0.021682(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	20.4	Com	PI	$\frac{0.015442(z-0.9950)}{(z-1)}$	6.9	-	22.4	0.3825	20.9	0.0930	2.4159
65	$\frac{0.022878(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	20.0	Com	PI	$\frac{0.016450(z-0.9950)}{(z-1)}$	6.5	-	22.1	0.3435	20.8	0.0835	2.3490
75	$\frac{0.024074(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	19.7	Com	PI	$\frac{0.017457(z-0.9950)}{(z-1)}$	6.0	-	21.9	0.3101	20.7	0.0754	2.2945
85	$\frac{0.025270(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	19.4	Com	PI	$\frac{0.018463(z-0.9950)}{(z-1)}$	5.7	-	21.7	0.2816	20.6	0.0685	2.2506

Tabela 137 – PI com filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 2 MF.

<i>Redução</i> t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	<i>Classe</i>	<i>Controlador</i> <i>VDFT</i>	t_s (ms)	<i>Overshoot</i> (%)	t_s V_{in} (ms)	J_{vin}	t_s <i>Carga</i> (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.014906(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)}$	24.7	Sem	PI	$\frac{0.010997(z-0.9954)}{(z-1)}$	11.1	-	26.6	0.7272	24.7	0.1772	3.0850
15	$\frac{0.016033(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9936)(z-0.9746)}$	23.8	Sem	PI	$\frac{0.012035(z-0.9954)}{(z-1)}$	10.2	-	25.8	0.6285	24.1	0.1529	2.8707
25	$\frac{0.017166(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	23.1	Sem	PI	$\frac{0.013074(z-0.9954)}{(z-1)}$	9.5	-	25.2	0.5486	23.7	0.1334	2.7056
35	$\frac{0.018302(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	22.5	Sem	PI	$\frac{0.014113(z-0.9954)}{(z-1)}$	8.9	-	24.8	0.4830	23.4	0.1175	2.5773
45	$\frac{0.019440(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	22.1	Sem	PI	$\frac{0.015153(z-0.9954)}{(z-1)}$	8.3	-	24.4	0.4291	23.1	0.1043	2.4763
55	$\frac{0.020579(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	21.7	Sem	PI	$\frac{0.016192(z-0.9954)}{(z-1)}$	7.8	-	24.0	0.3837	22.9	0.0932	2.3951
65	$\frac{0.021718(z-1)}{(z-0.9947)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	21.4	Sem	PI	$\frac{0.017231(z-0.9954)}{(z-1)}$	7.4	-	23.7	0.3452	22.7	0.0839	2.3288
75	$\frac{0.022858(z-1)}{(z-0.9947)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	21.1	Sem	PI	$\frac{0.018269(z-0.9954)}{(z-1)}$	7.0	-	23.5	0.3125	22.6	0.0759	2.2751
85	$\frac{0.023997(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	20.9	Sem	PI	$\frac{0.019307(z-0.9954)}{(z-1)}$	6.6	-	23.2	0.2841	22.5	0.0690	2.2309

Tabela 138 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{20\%}$ de GR = 2 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.017674(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9938)(z-0.9768)}$	23.8	Com	PI	$\frac{0.008306(z-0.9943)}{(z-1)}$	10.1	-	23.1	0.9135	20.4	0.2232	3.6584
15	$\frac{0.019016(z-1)}{(z-0.9939)(z-0.9936)(z-0.9746)}$	22.8	Com	PI	$\frac{0.009193(z-0.9944)}{(z-1)}$	9.2	-	22.4	0.7884	19.8	0.1924	3.3528
25	$\frac{0.020359(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	22.0	Com	PI	$\frac{0.010084(z-0.9944)}{(z-1)}$	8.5	-	22.4	0.6867	19.8	0.1676	3.0932
35	$\frac{0.021702(z-1)}{(z-0.9940)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	21.4	Com	PI	$\frac{0.010979(z-0.9944)}{(z-1)}$	7.9	-	21.6	0.6042	18.7	0.1473	2.8953
45	$\frac{0.023047(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	20.9	Com	PI	$\frac{0.011876(z-0.9945)}{(z-1)}$	7.4	-	21.2	0.5361	18.4	0.1305	2.7449
55	$\frac{0.024392(z-1)}{(z-0.9941)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	20.4	Com	PI	$\frac{0.012773(z-0.9945)}{(z-1)}$	6.9	-	21.0	0.4784	18.0	0.1165	2.6251
65	$\frac{0.025738(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	20.0	Com	PI	$\frac{0.013669(z-0.9945)}{(z-1)}$	6.6	-	20.9	0.4297	17.6	0.1046	2.5293
75	$\frac{0.027083(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	19.7	Com	PI	$\frac{0.014565(z-0.9945)}{(z-1)}$	6.3	-	20.7	0.3885	17.1	0.0945	2.4509
85	$\frac{0.028429(z-1)}{(z-0.9942)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	19.4	Com	PI	$\frac{0.015459(z-0.9945)}{(z-1)}$	5.9	-	20.6	0.3525	16.8	0.0858	2.3867

Tabela 139 – PI com filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 2 MF.

Redução t_s (%)	$Q_d(z)$	t_s $Q_d(z)$ (ms)	$L(z)$	Classe	Controlador VDFT	t_s (ms)	Overhoot (%)	t_s V_{in} (ms)	$J_{v_{in}}$	t_s Carga (ms)	J_{r_o}	$J_y(\rho)$
5	$\frac{0.016770(z-1)}{(z-0.9943)(z-0.9941)(z-0.9768)}$	24.7	Sem	PI	$\frac{0.008799(z-0.9948)}{(z-1)}$	11.0	-	25.0	0.9134	22.5	0.2229	3.5981
15	$\frac{0.018038(z-1)}{(z-0.9944)(z-0.9936)(z-0.9746)}$	23.8	Sem	PI	$\frac{0.009722(z-0.9948)}{(z-1)}$	10.1	-	24.6	0.7893	22.1	0.1925	3.2925
25	$\frac{0.019312(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9930)(z-0.9724)}$	23.1	Sem	PI	$\frac{0.010646(z-0.9949)}{(z-1)}$	9.5	-	24.0	0.6894	21.7	0.1681	3.0518
35	$\frac{0.020589(z-1)}{(z-0.9945)(z-0.9925)(z-0.9702)}$	22.5	Sem	PI	$\frac{0.011570(z-0.9949)}{(z-1)}$	8.9	-	23.6	0.6086	21.5	0.1481	2.8649
45	$\frac{0.021870(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9919)(z-0.9681)}$	22.1	Sem	PI	$\frac{0.012495(z-0.9949)}{(z-1)}$	8.3	-	23.3	0.5404	21.3	0.1315	2.7206
55	$\frac{0.023151(z-1)}{(z-0.9946)(z-0.9914)(z-0.9659)}$	21.7	Sem	PI	$\frac{0.013419(z-0.9950)}{(z-1)}$	7.9	-	23.1	0.4833	21.3	0.1176	2.6033
65	$\frac{0.024433(z-1)}{(z-0.9947)(z-0.9908)(z-0.9638)}$	21.4	Sem	PI	$\frac{0.014342(z-0.9950)}{(z-1)}$	7.4	-	22.8	0.4348	21.2	0.1058	2.5098
75	$\frac{0.025715(z-1)}{(z-0.9947)(z-0.9903)(z-0.9616)}$	21.1	Sem	PI	$\frac{0.015265(z-0.9950)}{(z-1)}$	7.0	-	22.6	0.3937	21.2	0.0957	2.4333
85	$\frac{0.026997(z-1)}{(z-0.9948)(z-0.9897)(z-0.9594)}$	20.9	Sem	PI	$\frac{0.016188(z-0.9950)}{(z-1)}$	6.7	-	22.5	0.3579	21.2	0.0871	2.3698

Tabela 140 – PI sem filtro e $Q_d(z)_{10\%}$ de GR = 2 MF.