

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

André Robert Caldeira de Souza

RESTRICÇÕES EM CONTROLADORES PID

Betim
2025

ANDRÉ ROBERT CALDEIRA DE SOUZA

RESTRIÇÕES EM CONTROLADORES PID

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Freitas de Abreu

Betim
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

S729r Souza, André Robert Caldeira de

Restrições em controladores PID / André Robert Caldeira de Souza. – 2025.

44 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Freitas de Abreu

1. Controladores programáveis. 2. Controle. 3. Controladores PID. 4. MATLAB (Programa de computador). 5. Engenharia de Controle e Automação. I. Souza, André Robert Caldeira de. II. Título.

CDU: 681.5

André Robert Caldeira de Souza

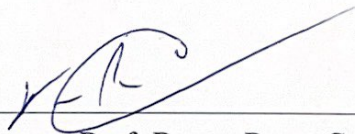
RESTRIÇÕES EM CONTROLADORES PID

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

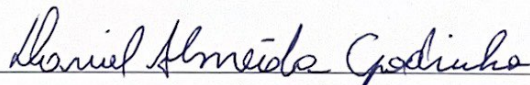
Aprovado em: 19 / 02 / 2025 pela banca examinadora:



Prof. Dr. Leandro Freitas (Orientador) - IFMG



Prof. Bruno Porto Caetano - IFMG



Prof. Dr. Daniel Godinho Almeida - IFMG

RESUMO

Os controladores PID desempenham um papel fundamental na indústria, sendo amplamente adotados devido à sua versatilidade e eficiência no controle de processos dinâmicos. No entanto, a aplicação prática desses controladores está sujeita a diversas restrições inerentes aos sistemas físicos, como a saturação dos atuadores e a troca entre modos de controle. Essas limitações podem comprometer o desempenho do sistema, dando origem a efeitos indesejados, como *windup* e *bumps*, que afetam a estabilidade e a resposta do controlador. Diante desse cenário, este trabalho busca analisar e quantificar o impacto dessas restrições no comportamento dos controladores PI e PID em sistemas de primeira ordem com atraso puro de tempo, bem como investigar a eficácia de técnicas destinadas a mitigar seus efeitos. Para isso, foram realizadas simulações no ambiente simulink do MATLAB®, permitindo avaliar o desempenho dos controladores sob diferentes condições operacionais. O método *back-calculation* foi adotado como estratégia de *anti-windup*, enquanto a técnica *bumpless-transfer* foi implementada para suavizar a transição entre modos de operação.

Palavras-chave: Controle PID; Restrições em controladores; *Anti-Windup*; *Bumpless-Transfer*; *Windup*; *Bumpss*.

ABSTRACT

PID controllers play a fundamental role in the industry, being widely adopted due to their versatility and efficiency in controlling dynamic processes. However, the practical application of these controllers is subject to various constraints inherent to physical systems, such as actuator saturation and mode switching. These limitations can compromise system performance, leading to undesirable effects such as *windup* and *bumps*, which affect the controller's stability and response. Given this scenario, this study aims to analyze and quantify the impact of these constraints on the behavior of PI and PID controllers in first-order systems with pure time delay, as well as to investigate the effectiveness of techniques designed to mitigate their effects. To achieve this, simulations were performed in MATLAB®'s Simulink environment, allowing the evaluation of controller performance under different operating conditions. The *back-calculation* method was adopted as an *anti-windup* strategy, while the *bumpless-transfer* technique was implemented to smooth the transition between operating modes.

Keywords: PID Controller; Constraints in Controllers; Anti-windup; Bumpless-Transfer; Windup; Bumpss.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de blocos do controlador PID Paralelo Clássico em que o termo K_p multiplica os termos $\frac{1}{T_i s}$ e $\frac{T_d s}{1+\alpha T_d s}$	15
Figura 2 – Acúmulo da ação integral do controlador quando há saturação do atuador, provocando um erro constante e gerando o efeito <i>windup</i>	16
Figura 3 – Diagrama de blocos de chaveamento entre controladores e modos de automático-manual para o controle do sistema G.	17
Figura 4 – Diagrama de blocos do <i>back-calculation</i> onde o caminho de <i>feedback</i> do integrador do controlador PID é alimentado pela diferença entre o sinal de saída do controlador e a saturação do atuador.	18
Figura 5 – Diagrama de blocos do controlador PID do sistema DCS da Allen-Bradley com o uso da técnica de <i>back-calculation</i>	19
Figura 6 – Sistema com e sem <i>bumpless-transfer</i> durante a troca de modos de operação.	20
Figura 7 – Diagrama de blocos <i>bumpless-transfer</i> do controlador PID com rastreamento de sinal e desativação do termo derivativo.	21
Figura 8 – Representação em diagrama de blocos da simulação do efeito <i>windup</i> com controlador PI e PID, incluindo atuador e perturbação.	23
Figura 9 – Representação em diagrama de blocos da simulação do efeito <i>bumps</i> com controlador PI e PID, incluindo troca de modo manual-automático e atuador.	23
Figura 10 – Implementação do controlador PI no simulink para simulação.	23
Figura 11 – Implementação do controlador PID no simulink para simulação.	24
Figura 12 – Controladores PI e PID implementados no simulink com saturador e perturbação sem a técnica de <i>anti-windup</i>	26
Figura 13 – Controladores PI e PID implementados no simulink com saturador, perturbação e com a técnica de <i>anti-windup</i>	26
Figura 14 – <i>Set-point</i> adotado na planta simulada com degrau unitário de ganho 1 por 300 segundos e ganho de 4,5 após os 300 segundos iniciais.	27
Figura 15 – Dinâmica da perturbação no sistema de controle com duração de 150 segundos a partir do segundo 700 após o início da simulação.	28
Figura 16 – Controlador com troca de modos de controle e sem <i>bumpless-transfer</i>	29
Figura 17 – Controlador com troca de modos de controle e com <i>bumpless-transfer</i>	29
Figura 18 – Implementação do <i>bumpless-transfer</i> no controlador PID com o rastreamento do sinal de controle pelo integrador e anulação do termo derivativo.	30
Figura 19 – Implementação do <i>bumpless-transfer</i> no controlador PI com o rastreamento do sinal de controle pelo integrador.	30
Figura 20 – Dinâmica de troca de modo manual para automático no segundo 700 após o início da simulação.	31

Figura 21 – Variável manipulada e controlada do controlador PI sem ação <i>anti-windup</i> , com mudança de <i>set-point</i> no segundo 300 e perturbação de 150 segundos a partir do segundo 700.	32
Figura 22 – Tempo de acomodação da variável controlada do controlador PI com a ação <i>anti-windup</i> para diferentes valores de T_i	33
Figura 23 – Tempo de acomodação da variável controlada do controlador PI com a ação <i>anti-windup</i> para diferentes valores de T_i após a mudança de <i>set-point</i>	34
Figura 24 – Variável manipulada e controlada do controlador PID sem ação <i>anti-windup</i> , com mudança de <i>set-point</i> no segundo 300 e perturbação de 150 segundos a partir do segundo 700.	35
Figura 25 – Tempo de acomodação da variável controlada do controlador PID com a ação <i>anti-windup</i> para diferentes valores de T_i	36
Figura 26 – Tempo de acomodação do controlador PID com a ação <i>anti-windup</i> para diferentes valores de T_i após a mudança de <i>set-point</i>	37
Figura 27 – Variável controlada e manipulada do controlador PI com e sem <i>bumpless-transfer</i>	38
Figura 28 – Variável controlada do controlador PI com e sem <i>bumpless-transfer</i>	39
Figura 29 – Variável controlada e manipulada do controlador PID com e sem <i>bumpless-transfer</i>	40
Figura 30 – Variável controlada do controlador PID com e sem <i>bumpless-transfer</i>	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Termos do algoritmo PID.	13
Tabela 2	– Resposta específica de cada ganho do controlador PID.	14
Tabela 3	– Valores dos termos do controlador PID.	24
Tabela 4	– Valores dos termos do controlador PI.	24
Tabela 5	– Valores T_i utilizados para análise de desempenho do <i>back-calculation</i> nos controladores PID com base na literatura e estudo publicado.	25
Tabela 6	– Valores T_i utilizados para análise de desempenho do <i>back-calculation</i> nos controladores PI definidos experimentalmente.	25
Tabela 7	– Comparativo entre tempo para acomodação e <i>overshoot</i> da variável controlada do controlador PI, com a ação <i>anti-windup</i> para diferentes valores de T_i . . .	33
Tabela 8	– Comparativo entre tempo para acomodação e <i>overshoot</i> da variável controlada do controlador PID, com a ação <i>anti-windup</i> para diferentes valores de T_i . .	36
Tabela 9	– Tempo de acomodação da variável controlada do controlador PI em modo automático.	39
Tabela 10	– Tempo de acomodação do controlador PID em modo automático.	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	11
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>11</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>11</i>
1.2	Justificativa	12
1.3	Organização do Texto	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Cotroladores PID	13
2.2	Restrições em Contraladores PID	15
2.3	<i>Anti-Windup</i>	<i>17</i>
2.4	<i>Bumpless-Transfer</i>	<i>20</i>
3	METODOLOGIA	22
3.1	Sistema	22
3.2	Controladores	23
<i>3.2.1</i>	<i>Sintonia dos Controladores</i>	<i>24</i>
3.3	Ganho <i>back-calculation</i>	24
3.4	Dinâmica do Teste	26
<i>3.4.1</i>	<i>Teste Anti-Windup</i>	<i>26</i>
<i>3.4.2</i>	<i>Teste Bumpless-Transfer</i>	<i>29</i>
4	RESULTADOS	32
4.1	Resultados Testes <i>Anti-windup</i>	32
<i>4.1.1</i>	<i>Controlador PI</i>	<i>32</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Controlador PID</i>	<i>35</i>
4.2	Resultados Testes <i>Bumpless-Transfer</i>	38
<i>4.2.1</i>	<i>Controlador PI</i>	<i>38</i>
<i>4.2.2</i>	<i>Controlador PID</i>	<i>39</i>
5	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

O controle de processos é uma área fundamental na engenharia, sendo amplamente aplicada em diversas indústrias, como a de alimentos, petroquímica, farmacêutica e entre outras. Dentre as diversas técnicas de controle, o controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) é um controlador amplamente utilizado na indústria. Isso se deve principalmente pela sua facilidade de aplicação e parametrização, bem como a alta disponibilidade desse algoritmo em diversos fabricantes de equipamentos de controle. Um exemplo de uso desse controlador é na indústria cimenteira, onde é comum o uso dos controladores PID em balanças integradoras que são responsáveis pela dosagem de matéria-prima na produção de cimento.

Entretanto, para que a aplicação do controlador PID seja eficiente, é necessário analisar diversos fatores que podem limitar seu desempenho. Entre esses fatores, destacam-se os limites dos atuadores, o chaveamento entre controladores e a troca do modo de controle entre automático e manual, os quais são conhecidos como restrições em controladores. Essas restrições podem gerar efeitos indesejados, como *windup* e *bumps*, que resultam em *overshoots* e atrasos na resposta do controlador.

Este trabalho analisará algumas das restrições nos controladores PID, buscando quantificar o impacto desses efeitos em sistemas de primeira ordem com atraso puro de tempo controlados pelo PID. O estudo também abordará métodos que visam melhorar a resposta do sistema, garantindo maior eficiência e estabilidade.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Quantificar e analisar os efeitos do *windup*, causado pela saturação dos atuadores, e dos *bumps*, resultantes da comutação entre modos de controle, por meio da implementação dos controladores PI e PID, com o objetivo de avaliar as soluções propostas para mitigá-los.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- Implementar um sistema de controle no ambiente simulink do MATLAB® para simular os controladores PI e PID em diferentes condições operacionais;
- Avaliar e quantificar os impactos do *windup* e *bumps*, no desempenho dos controladores PI e PID;
- Implementar a técnica *anti-windup* e *bumpless-transfer*;
- Avaliar e quantificar a eficiência das técnicas de *anti-windup* e *bumpless-transfer* no combate aos efeitos de *windup* e *bumps* nos controladores PI e PID.

1.2 Justificativa

Com a ampla implementação dos controladores PI e PID nos processos industriais, torna-se necessário avaliar, de forma mais específica, os impactos dos efeitos restritivos. O *windup* e o *bumps* são efeitos indesejados que afetam significativamente o desempenho e a confiabilidade desses controladores, podendo comprometer a estabilidade do sistema e reduzir sua eficiência operacional.

Diversos estudos já buscam compreender e analisar esses fenômenos com o objetivo de mitigá-los (ASTRÖM, 1995; CHEONG; SAFONOV, 2008; TARBOURIECH, 2007; PENG; HANUS, 1996; DOROSHENKO, 2017; IRIONDO, 2012; GARCIA, 2006; WERLING, 2008). No entanto, a aplicação prática desses conceitos em diferentes cenários industriais continua demandando investigações mais aprofundadas, especialmente no que se refere a quantificação dos impactos dessas restrições e a eficácia das técnicas para combatê-los. O avanço nesse campo permite a otimização dos controladores, tornando-os mais robustos e confiáveis diante das limitações impostas pelos sistemas reais.

Este trabalho busca contribuir para a quantificação dos efeitos do *windup* e *bumps* no desempenho dos controladores PI e PID. Além disso, pretende quantificar os ganhos de desempenho obtidos com a implementação de técnicas de mitigação desses efeitos, reforçando os benefícios dessa implementação. A compreensão mais detalhada desses impactos e das soluções associadas a eles pode proporcionar melhorias significativas na indústria, resultando em processos mais seguros, eficientes e economicamente viáveis.

1.3 Organização do Texto

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2, será apresentada uma revisão teórica dos conceitos fundamentais relacionados aos controladores PI e PID, incluindo suas características. Além disso será abordado o conceito de restrição em controladores, bem como os efeitos de *windup* e *bumps*. Também será abordado os conceitos teóricos das técnicas de *anti-windup* e *bumpless-transfer*. Em seguida, no Capítulo 3, serão discutidos os métodos de implementação e controle, com foco em um sistema estipulado para este trabalho. No Capítulo 4, serão apresentados os resultados obtidos dos métodos utilizados no Capítulo 3. No Capítulo 5 serão apresentadas as considerações finais, destacando a importância das análises realizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica aprofundada sobre os controladores PID, explorando os fundamentos teóricos de suas ações proporcional, integral e derivativa. Será discutida as vantagens desses controladores, como simplicidade de implementação, baixo custo e eficiência. Além disso, o capítulo explica os efeitos de ajustes nos parâmetros do PID sobre o comportamento do sistema, incluindo estabilidade, *overshoot* e tempo de resposta.

Adicionalmente, o capítulo aborda os desafios impostos por restrições práticas, como a saturação de atuadores e o fenômeno de *windup*, que compromete o desempenho do sistema. Para mitigar esses problemas, são utilizadas as técnicas de *anti-windup* (com destaque para o método *back-calculation*), e *bumpless-transfer*, que assegura transições suaves entre modos manual e automático. Essas soluções são detalhadas com suas fundamentações teóricas e aplicações práticas.

2.1 Cotroladores PID

No contexto do controle de processos industriais, destaca-se um controlador amplamente utilizado devido à sua versatilidade e eficiência: o controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Sua popularidade é atribuída a diversas vantagens, como a facilidade de implementação, o baixo custo, a necessidade de ajustar apenas um número reduzido de parâmetros e o desempenho satisfatório em uma ampla gama de aplicações práticas (CAMPOS, 2008). Além disso, o controlador PID é altamente acessível e amplamente integrado aos sistemas de controle industriais, consolidando-se como uma solução essencial na automação e no gerenciamento de processos.

O controlador PID ajusta a saída de um sistema controlado com base na diferença entre o valor desejado (*set-point*) e o valor real da variável de controlada. Essa diferença, conhecida como erro, é processada por três ações principais: (P) Proporcional, (I) Integral, (D) Derivativo (CAMPOS, 2008). A Tabela 1 demonstra a ação de cada termo no algoritmo:

Tabela 1 – Termos do algoritmo PID.

P	Correção proporcional ao erro	A correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado.
I	Correção proporcional ao produto erro x tempo	Erros pequenos mas que existem há muito tempo requerem correção mais intensa.
D	Correção proporcional à taxa de variação do erro	Se o erro está variando muito rápido, esta taxa de variação deve ser reduzida para evitar oscilações.

Fonte: (NOVUS, 2003).

Existem diversas formas para implementar os termos do controlador PID, neste trabalho

será utilizado modelo paralelo clássico, por ser o mais encontrado na prática (CAMPOS, 2008). A principal característica desse modelo está no uso da ação proporcional K_p nas demais ações do controlador. No modelo matemático do controlador, a ação K_p multiplica todas as demais ações, resultando na seguinte equação:

$$u(t) = K_p \times e(t) + \frac{K_p}{T_i} \times \int e(t)dt + K_p \times T_d \times \frac{de}{dt}(t) + u_0, \quad (2.1)$$

em que $u(t)$ é a variável manipulada, $e(t)$ o erro, K_p o ganho proporcional, T_i o tempo integral e T_d o tempo derivativo.

O resultado da multiplicação de K_p pelas demais ações resulta nos ganhos de $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ e $K_d = K_p \times T_d$. Cada ganho é responsável por provocar uma resposta específica no controle do sistema onde o PID é implementado. A Tabela 2 demonstra o efeito de cada implementação.

Tabela 2 – Resposta específica de cada ganho do controlador PID.

Resposta	Tempo de Subida	<i>Overshoot</i>	Tempo de Acomodação	Erro Regime Permanente
K_p	Reduz	Aumenta	Pouco Efeito	Reduz
K_i	Reduz	Aumenta	Aumenta	Elimina
K_d	Pouco Efeito	Reduz	Reduz	Não Muda

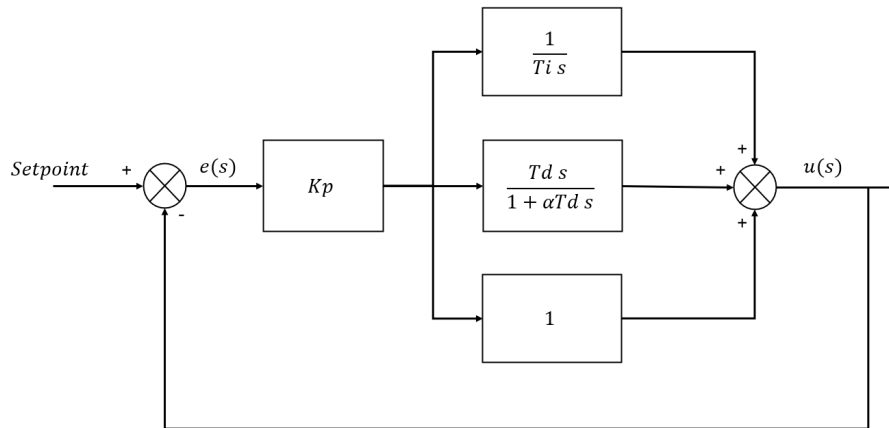
Fonte: (FREITAS, 2019).

No uso do controlador PID em um equipamento físico, não é possível implementar diretamente seu modelo matemático pois o termo derivativo é não causal (PONTES, 2016). Isso ocorre porque a ordem a função de transferência do termo derivativo do numerador é maior que a ordem do denominador, fazendo com que o termo $T_d s$ apresente um ganho que cresce sem limites quando a frequência do sinal aumenta (OLIVEIRA, 2018). Para contornar esse problema, é necessário multiplicar o termo $T_d s$ por:

$$D(s) = \frac{1}{1 + \alpha T_d s}, \quad (2.2)$$

em que α deve ser um valor pequeno para que ele não interfira no desempenho da ação derivativa, tipicamente definido em $\alpha = 0,125$ (CAMPOS, 2008). Dessa forma, o diagrama de blocos do controlador PID é representado na a Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de blocos do controlador PID Paralelo Clássico em que o termo K_p multiplica os termos $\frac{1}{T_i s}$ e $\frac{T_d s}{1 + \alpha T_d s}$.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

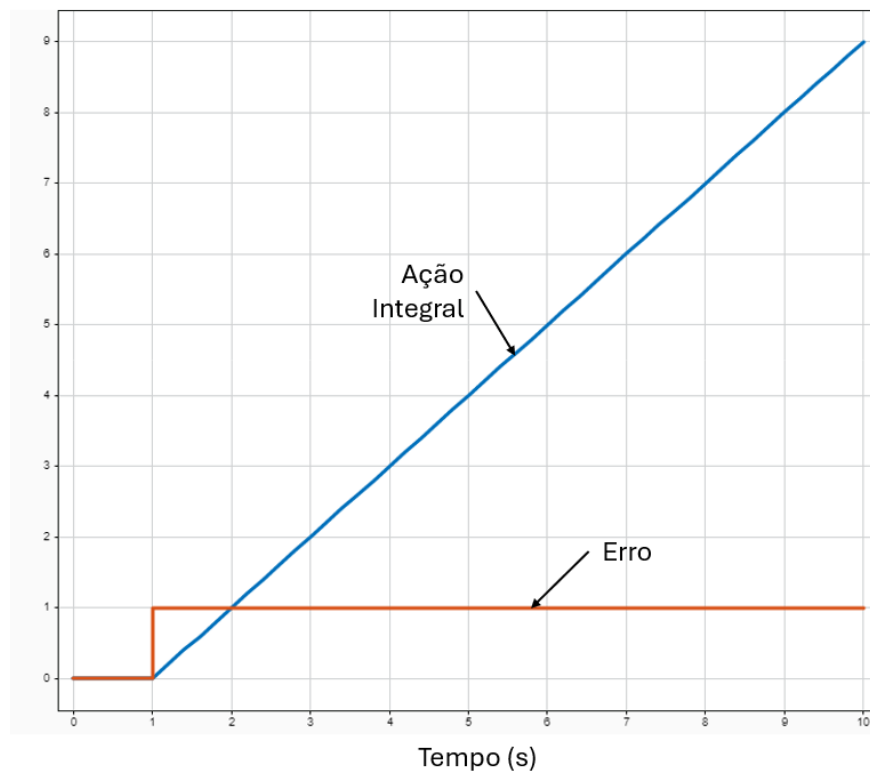
2.2 Restrições em Controladores PID

Restrições em controladores PID podem ser compreendidas como todos os fatores ou limitações que impactam diretamente o desempenho dos controladores quando são implementados em sistemas reais. Um exemplo comum dessas restrições é a saturação dos atuadores, que ocorre quando os sinais de controle gerados pelo PID ultrapassam os limites máximos ou mínimos dos dispositivos de atuação como válvulas e motores. Válvulas possuem limites físicos que impedem sua abertura além de determinado ponto e um atuador acionado por motor está sujeito a uma velocidade máxima de operação (PENG; HANUS, 1996).

Quando um controlador PID opera em condições onde ocorre saturação pode surgir um problema significativo relacionado ao termo integrador do controlador. Nessas situações, o integrador continua acumulando erro ao longo do tempo, mesmo que sua saída já tenha atingido os limites de saturação impostas pelo atuador. Esse comportamento leva a um acúmulo indesejado de "carga" no integrador, fenômeno conhecido como *windup* (ASTRÖM, 1995).

O *windup* pode gerar consequências prejudiciais ao desempenho do sistema de controle, incluindo tempos de assentamento prolongados, respostas oscilatórias, *overshoots* excessivos e erros em regime permanente na variável controlada. Em casos extremos, o fenômeno pode até causar instabilidades no sistema. A Figura 2 ilustra o efeito do *windup* sobre o termo integral do controlador PID quando este opera em uma região de saturação do atuador. É possível observar como o acúmulo no integrador persiste enquanto a saída do controlador está limitada, provocando assim um erro constante no sistema.

Figura 2 – Acúmulo da ação integral do controlador quando há saturação do atuador, provocando um erro constante e gerando o efeito *windup*.

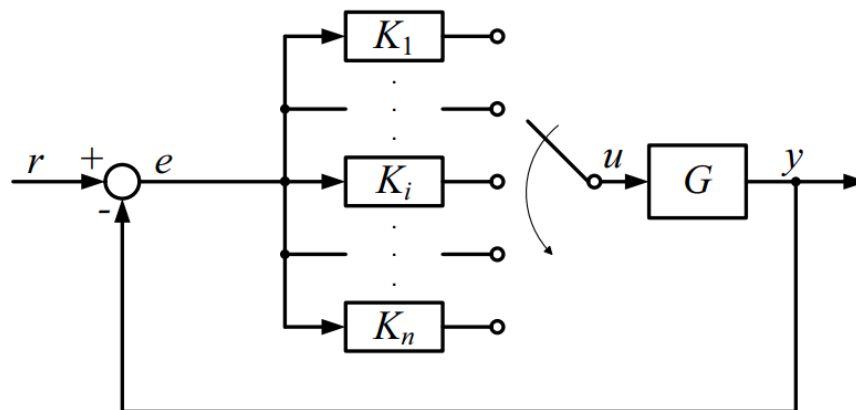


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Para combater esse fenômeno, foi criada o conceito de *anti-windup* que refere-se às técnicas de controle projetadas para lidar com o problema de saturação em sistemas controlados, especialmente aqueles que utilizam controladores integradores (TARBOURIECH, 2007).

Outro exemplo comum de restrições é a troca abrupta de modos de operação do controlador, podendo ser o chaveamento entre dois ou mais controladores ou até mesmo a troca de manual para automático. Esses chaveamentos provocam um fenômeno conhecido como *bumps*. A Figura 3 demonstra o diagrama de blocos do chaveamento entre controladores.

Figura 3 – Diagrama de blocos de chaveamento entre controladores e modos de automático-manual para o controle do sistema G .



Fonte: (CHEONG; SAFONOV, 2008).

Os *bumps* referem-se a transientes indesejados que ocorrem na saída de um sistema de controle durante a troca entre controladores ou modos de operação. Quando um controlador ativo é substituído por um novo controlador, ou por um controle manual, pode haver uma discrepância nas saídas dos dois controladores no instante da comutação. Essa diferença pode resultar em um salto abrupto ou uma mudança rápida na saída do sistema, causando comportamentos indesejados como oscilações ou picos momentâneos, tanto na variável manipulada, quanto na variável controlada (CHEONG; SAFONOV, 2008).

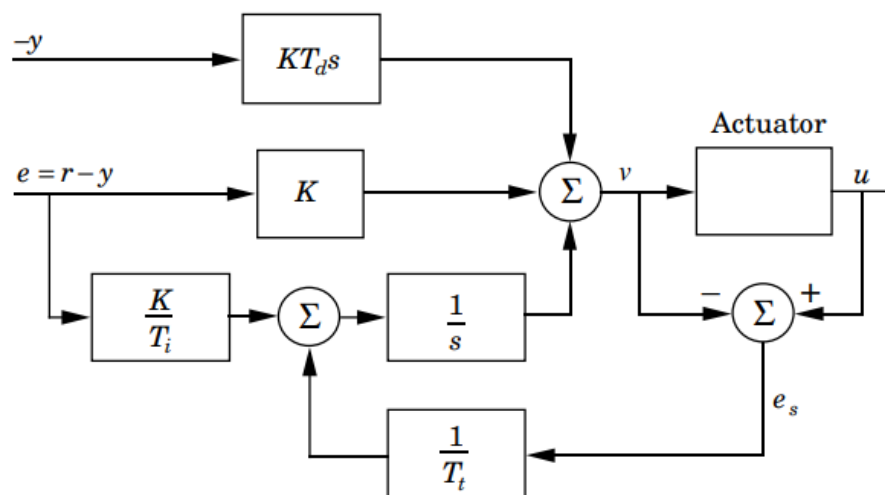
Para contornar os *bumps*, foi criado o método denominado *bumpless-transfer* que refere-se a um método utilizado em sistemas de controle para garantir uma transição suave e contínua entre diferentes controladores ou modos de operação, evitando transientes indesejados que podem ocorrer durante a transição.

2.3 Anti-Windup

O desenvolvimento de técnicas modernas de *anti-windup*, que surgiram principalmente a partir do final do século XX, buscam fornecer garantias rigorosas de estabilidade e desempenho, utilizando métodos sistemáticos para projetar compensadores *anti-windup* que podem ser aplicados em contextos globais e locais (TARBOURIECH, 2007). A abordagem *anti-windup* envolve a separação do controlador em duas partes: uma parte que busca o desempenho nominal e outra que lida com as restrições de saturação. Inicialmente, um controlador linear é projetado sem considerar as limitações de saturação. Em seguida, um compensador *anti-windup* é desenvolvido para garantir que a estabilidade do sistema seja mantida e que a degradação do desempenho seja minimizada quando a saturação ocorre. Essa técnica permite que os controladores existentes sejam adaptados para melhorar seu desempenho em situações de saturação, tornando-a uma escolha popular entre engenheiros (TARBOURIECH, 2007).

Existem diversas técnicas de *anti-windup* como *integrator clamping* e *back-calculation*. A técnica *integrator clamping* consiste no uso da ação integradora somente em condições específicas do sistema onde não há saturação (ASTRÖM, 1995). Para este trabalho foi utilizada a técnica *back-calculation* por ser uma técnica de simples implementação, além de se tratar de uma técnica clássica quando o assunto é combater o fenômeno de *windup* (JALIL, 2014). O *back-calculation* é uma técnica aplicada em controladores PID para prevenir o fenômeno de *windup* do integrador. O método funciona adicionando um caminho de *feedback* ao redor do integrador que é ativado somente durante a saturação do atuador (ASTRÖM, 1995). A Figura 4 demonstra o funcionamento do *back-calculation* no formato de diagrama de blocos.

Figura 4 – Diagrama de blocos do *back-calculation* onde o caminho de *feedback* do integrador do controlador PID é alimentado pela diferença entre o sinal de saída do controlador e a saturação do atuador.



Fonte: (ASTRÖM, 1995).

Esse *feedback* é baseado na diferença entre o sinal desejado pelo controlador (v) e a saída limitada do atuador (u), formando um erro adicional (e_s). Esse erro é realimentado no integrador com um ganho proporcional inverso à constante de tempo de rastreamento (T_t), permitindo um ajuste dinâmico e gradual do termo integral (ASTRÖM, 1995).

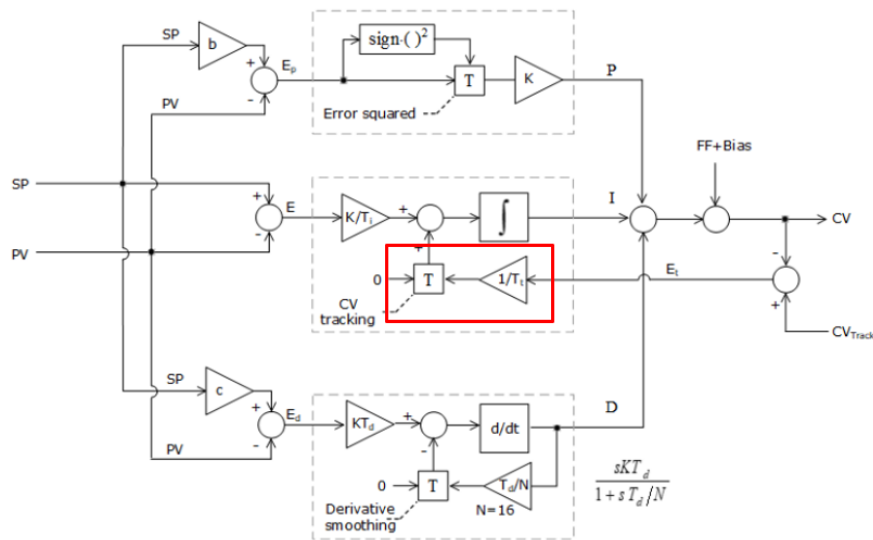
Quando o sistema não está saturado, e_s é zero e o integrador opera normalmente, garantindo que o método não interfira na operação padrão. Já durante a saturação, o método recalcula o valor do integrador de forma controlada, evitando grandes variações e permitindo uma transição suave para o estado normal (ASTRÖM, 1995).

O desempenho do *back-calculation* é altamente dependente do valor de T_t , que deve ser cuidadosamente escolhido: valores muito baixos podem causar instabilidades devido à sensibilidade a ruídos, enquanto valores muito altos podem reduzir a eficiência do ajuste (ASTRÖM, 1995). Uma regra prática para definir T_t é $T_t = \sqrt{T_i T_d}$, em que T_i e T_d são, respectivamente, as constantes de tempo integral e derivativa do controlador PID (ASTRÖM, 1995). Além dessa regra para a definição de T_t , este trabalho também investiga o uso de outras definições, conforme

utilizado por (JALIL, 2014), onde $T_i = T_i$ e $T_i = T_d$. No entanto, essas definições são aplicáveis apenas ao controlador PID, pois requerem o termo derivativo T_d . Portanto, este estudo busca explorar novas formas de determinar o valor de T_i para o controlador PI e compará-las, visando quantificar a eficiência de cada regra.

Em controladores industriais, essa técnica é empregada por meio de blocos de programação que podem ser parametrizados. A fabricante Allen-Bradley (Rockwell Automation) faz uso dessa técnica em seu sistema DCS (*Distributed Control System*). A Figura 5 demonstra a aplicação do método *back-calculation* no bloco de programação do controlador PID.

Figura 5 – Diagrama de blocos do controlador PID do sistema DCS da Allen-Bradley com o uso da técnica de *back-calculation*.

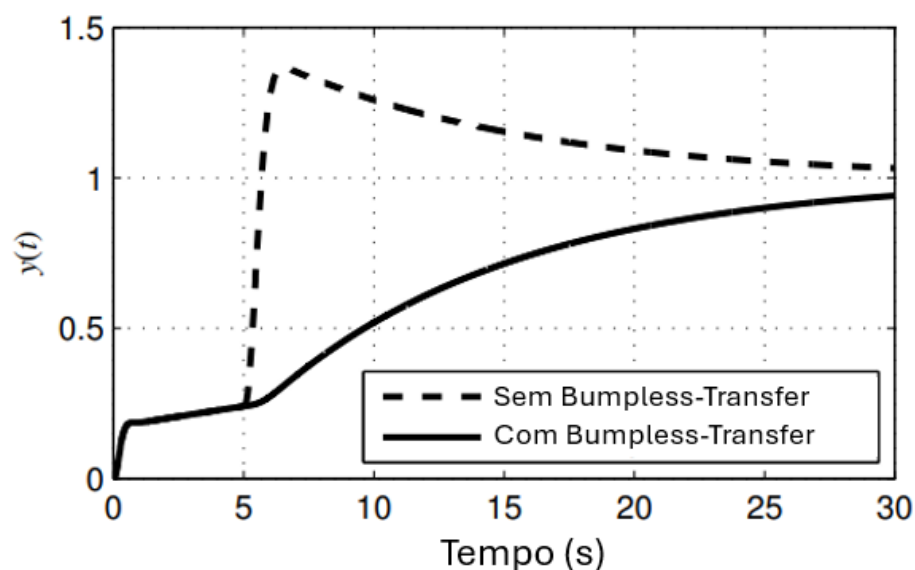


Fonte: (AUTOMANTION, 2024).

2.4 Bumpless-Transfer

A técnica de *bumpless-transfer* garante uma transição suave entre os modos de operação manual-automático e entre controladores, prevenindo transientes indesejados que poderiam impactar negativamente o desempenho do sistema. Ao assegurar a continuidade no sinal de controle durante a troca de modos, o *bumpless-transfer* promove menos oscilações e aumenta a eficiência nos processos controlados. A Figura 6 demonstra a diferença entre o sistema que possui a técnica de *bumpless-transfer* e o que não possui esse sistema.

Figura 6 – Sistema com e sem *bumpless-transfer* durante a troca de modos de operação.

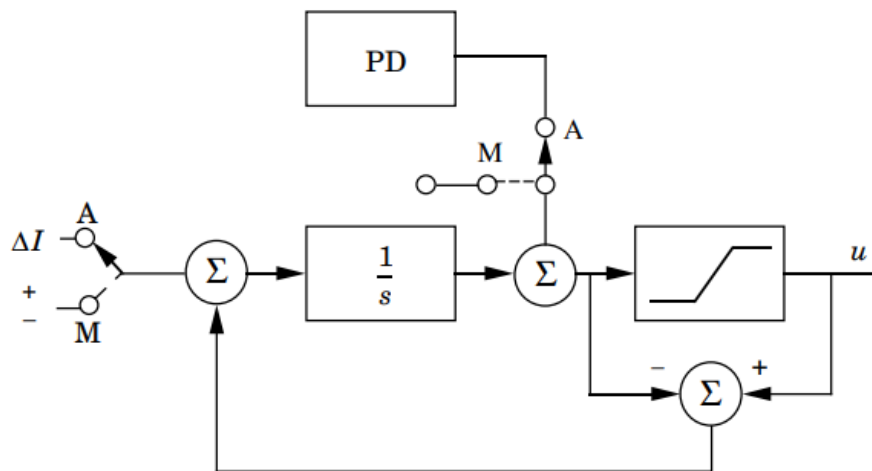


Fonte: Adaptado de (CHEONG; SAFONOV, 2008).

Quando o sistema está em modo manual, o sinal de saída do controlador é manipulado diretamente pelo operador, enquanto no modo automático, é gerado pelo algoritmo de controle. O desafio surge porque o sinal produzido pelo algoritmo automático pode diferir do sinal ajustado manualmente. No momento da troca, essas diferenças podem causar variações abruptas (*overshoots*) no sinal de controle, resultando em oscilações (ASTRÖM, 1995).

O *bumpless-transfer* funciona ajustando o estado interno do controlador para que o sinal gerado no modo automático seja igual ao sinal atual no modo manual no momento da mudança. Isso é alcançado por mecanismos que sincronizam os estados do controlador, como integradores que acumulam as mudanças incrementais de forma contínua (ASTRÖM, 1995). A Figura 7 demonstra o funcionamento do *bumpless-transfer* em controladores PID.

Figura 7 – Diagrama de blocos *bumpless-transfer* do controlador PID com rastreamento de sinal e desativação do termo derivativo.



Fonte: (ASTRÖM, 1995).

Para a sincronização dos estados do controlador, por meio do integrador do controlador PID, o *bumpless-transfer* é responsável por rastrear a saída de controle durante o modo de operação manual, através da realimentação da diferença entre o sinal do atuador e o sinal do controlador. Dessa forma, o controlador automático sempre estará sincronizado com o controle manual, evitando oscilações durante a troca de modos de operação. Além disso, para o controlador PID, também é necessário que, nos momentos em que há mudança de automático para manual, o termo derivativo seja zerado para evitar instabilidade no controle (caso a derivada do erro não seja igual a zero) durante a troca de modos de operação (ASTRÖM, 1995).

Em controladores industriais, essa técnica é empregada por meio de blocos de programação que podem ser parametrizados. A fabricante Allen-Bradley (Rockwell Automation) faz uso dessa técnica em seu sistema DCS (*Distributed Control System*). Quando a opção de *bumpless-transfer* é ativada o controlador PID atua como um algoritmo PID de posição onde a ação de controle muda com erro de loop e não com alteração de erro (AUTOMANTION, 2024).

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia adotada para avaliar os efeitos de *windup* e *bumps* a fim de validar a eficácia da técnica de combate a esses efeitos. O sistema foi modelado no simulink do MATLAB®, incluindo controladores PI e PID ajustados para diferentes cenários, com e sem saturação. A estrutura do sistema inclui perturbações e variações de *set-point*, simulando condições reais de operação.

São descritas as etapas de configurações dos parâmetros de teste e as estratégias de análise. Testes específicos são realizados para avaliar o impacto do *anti-windup* e do *bumpless-transfer* no desempenho dos controladores. O capítulo também apresenta as configurações utilizadas para o ganho T_i , a fim de explorar como esse parâmetro influencia a capacidade da técnica de combate ao *windup*.

3.1 Sistema

Utilizando o simulink do MATLAB® foi realizado a montagem de infraestrutura para que fosse possível simular os efeitos provocados pelo fenômeno de *windup*, bem como a eficiência da técnica de *back-calculation*. Para a simulação da planta, foi adotado um sistema de primeira ordem com atraso puro de tempo, uma vez que são mais sensíveis ao efeito de *windup* (PADULA, 2012), dessa forma, a planta é descrita pela função de transferência:

$$G(s) = \frac{5}{5s + 1} e^{-s}. \quad (3.1)$$

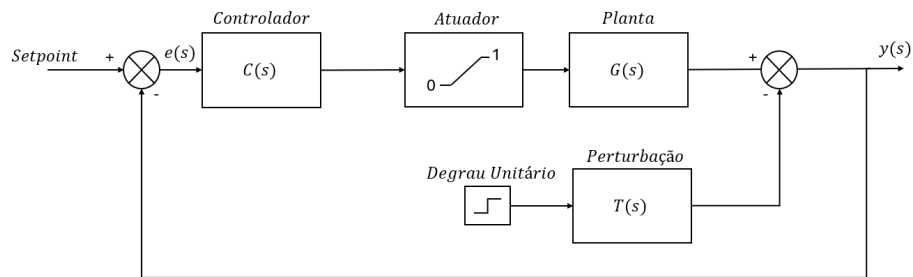
Para simular os limites de saturação do atuador no sistema, foi utilizado o bloco de saturação do simulink. Este bloco é configurável com os valores máximos e mínimos para a saturação do sinal de entrada. Para este trabalho os valores configurados foram 1 (para o limite superior) e 0 (para o limite inferior).

A simulação do sistema incluiu a adição de perturbação que é descrita por:

$$T(s) = \frac{1}{s + 1}, \quad (3.2)$$

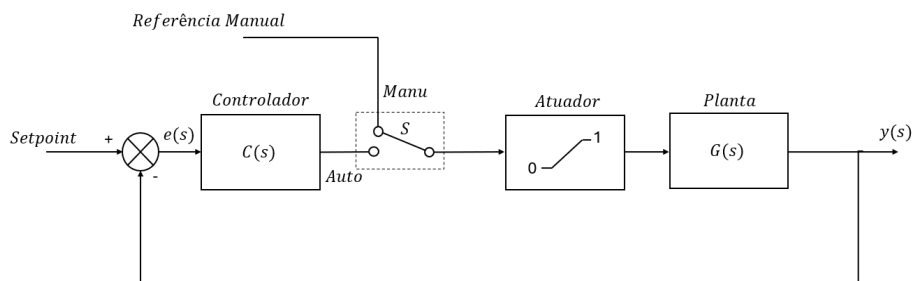
com intuito de avaliar o impacto do *windup* no desempenho do controlador, especialmente em situações em que a rejeição de perturbações provoca a saturação do atuador do sistema. Assim como a função de transferência da planta, foi utilizado um sistema de primeira ordem para descrever a perturbação pois, na prática, busca-se modelar os sistemas em sistemas de primeira ordem (CAMPOS, 2008). A entrada da perturbação no sistema acontece em um determinado tempo na simulação que é descrito detalhadamente nas seções posteriores. As simulações são ilustradas nos diagramas de blocos da Figura 8 e Figura 9.

Figura 8 – Representação em diagrama de blocos da simulação do efeito *windup* com controlador PI e PID, incluindo atuador e perturbação.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Figura 9 – Representação em diagrama de blocos da simulação do efeito *bumps* com controlador PI e PID, incluindo troca de modo manual-automático e atuador.

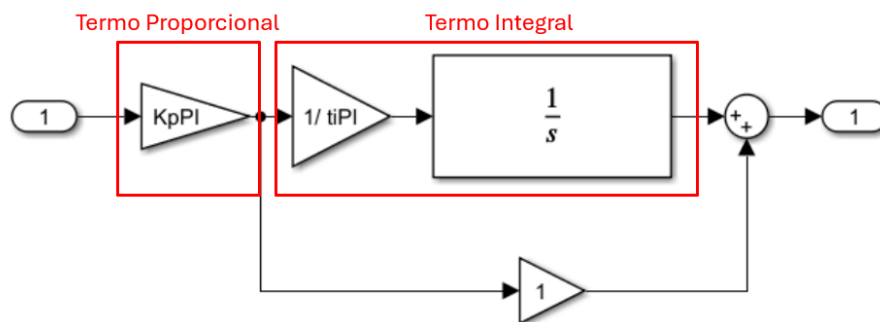


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

3.2 Controladores

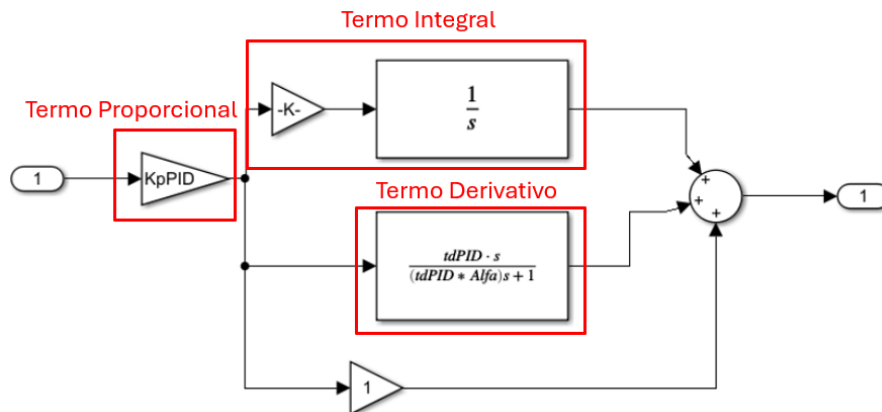
A montagem da infraestrutura consistiu em utilizar um controle PI e PID paralelo clássico montado diretamente no simulink. A Figura 10 e a Figura 11 demonstram a implementação de ambos os controladores.

Figura 10 – Implementação do controlador PI no simulink para simulação.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Figura 11 – Implementação do controlador PID no simulink para simulação.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

3.2.1 Sintonia dos Controladores

Para sintonia dos controladores PI e PID, foi adotado o método da integral do erro absoluto ponderado no tempo (ITAE) uma vez que sua característica é ser resistente a perturbações e minimizar *overshoots* no sistema (AWOUDA, 2010). Os valores utilizados em cada controlador estão descritos na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 – Valores dos termos do controlador PID.

K_p	0,75
T_i	6,52
T_d	0,34
α	0,0425

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Tabela 4 – Valores dos termos do controlador PI.

K_p	0,51
T_i	5,01

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

3.3 Ganho *back-calculation*

Para identificar os valores de T_i que proporcionam os melhores resultados no combate ao fenômeno de *windup* no sistema analisado, foram adotados os valores descritos na Tabela 5 e Tabela 6. Esses valores permitem avaliar o impacto de diferentes ajustes do parâmetro T_i sobre o desempenho do *back-calculation*. A análise incluiu a comparação entre vários valores, buscando compreender como cada um influencia a capacidade do sistema em mitigar os efeitos indesejados do *windup*.

Tabela 5 – Valores T_t utilizados para análise de desempenho do *back-calculation* nos controladores PID com base na literatura e estudo publicado.

Referência	Controlador PID
(JALIL, 2014)	$T_t = T_i$
(JALIL, 2014)	$T_t = T_d$
(ASTRÖM, 1995; JALIL, 2014)	$T_t = \sqrt{T_i T_d}$

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Tabela 6 – Valores T_t utilizados para análise de desempenho do *back-calculation* nos controladores PI definidos experimentalmente.

Controlador PI
$T_t = T_i$
$T_t = T_i \times 50\%$
$T_t = T_i \times 30\%$
$T_t = T_i \times 10\%$
$T_t = T_i \times 1\%$

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

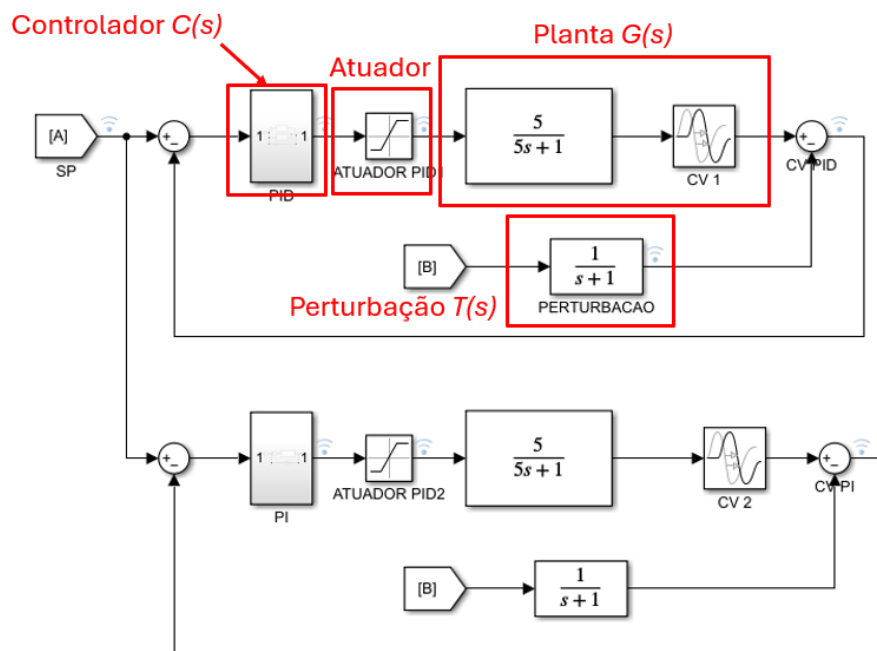
Os valores selecionados para o ganho T_t do controlador PID foram definidos com base em recomendações da literatura (ASTRÖM, 1995) e no estudo de (JALIL, 2014). Para o controlador PI, os valores de T_t foram determinados experimentalmente, considerando sua proporcionalidade em relação ao termo T_i , com o objetivo de investigar o desempenho do controlador na minimização dos efeitos do *windup*.

3.4 Dinâmica do Teste

3.4.1 Teste *Anti-Windup*

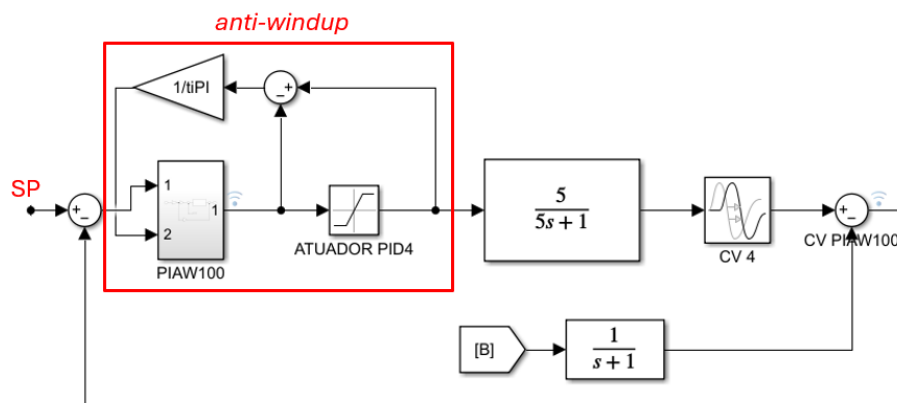
Para a realização dos testes de *anti-windup*, as implementações foram feitas no simulink. Os testes foram divididos em duas categorias: sem *anti-windup* e com *anti-windup*, ambas abordando os controladores PI e PID. A implementação completa dos testes seguiu conforme demonstrado nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Controladores PI e PID implementados no simulink com saturador e perturbação sem a técnica de *anti-windup*.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

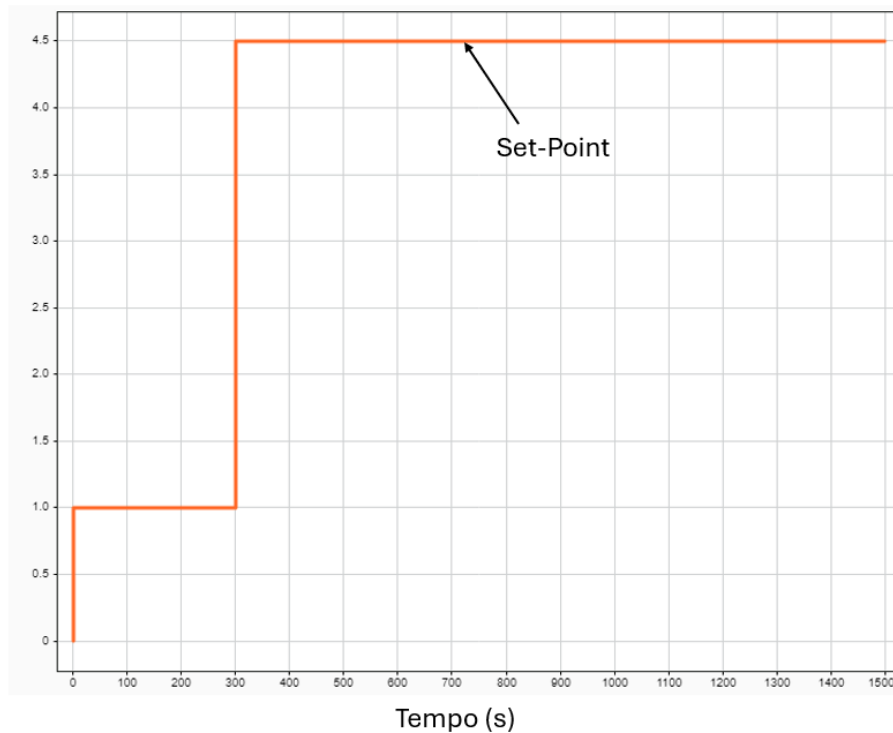
Figura 13 – Controladores PI e PID implementados no simulink com saturador, perturbação e com a técnica de *anti-windup*.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Para avaliar o comportamento do sistema em diferentes cenários, foi aplicada uma sequência de degraus unitários como *set-point*. Inicialmente, um degrau unitário com ganho igual a 1 foi mantido por 300 segundos, seguido pela aplicação de um segundo degrau unitário com ganho de 4,5 conforme demonstrado na Figura 14.

Figura 14 – *Set-point* adotado na planta simulada com degrau unitário de ganho 1 por 300 segundos e ganho de 4,5 após os 300 segundos iniciais.

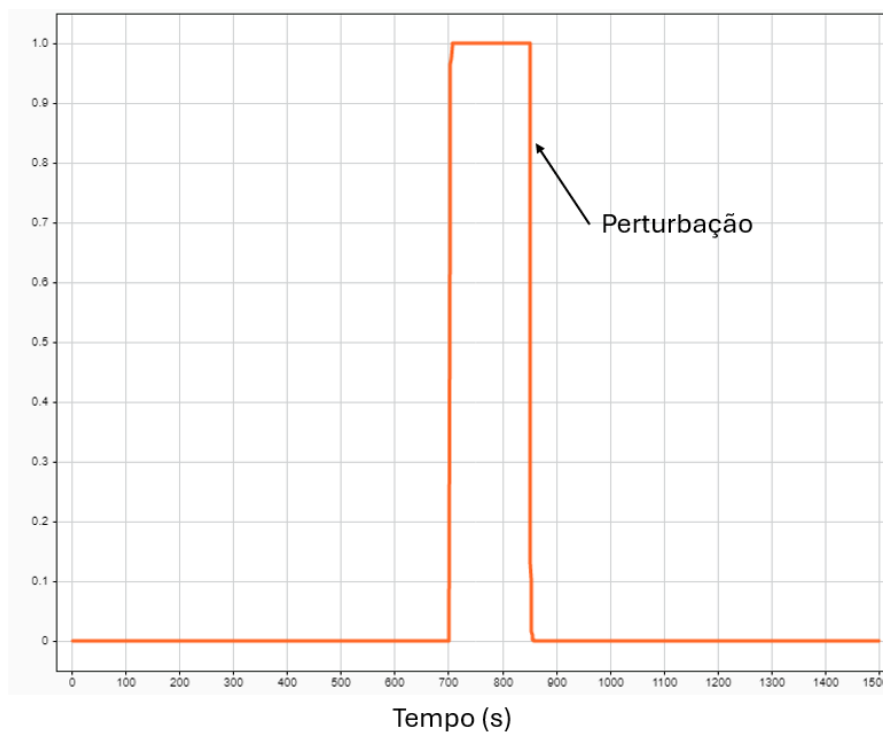


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Esse procedimento teve como objetivo analisar a resposta do sistema à mudanças de *set-point* que possam provocar o efeito *windup*, permitindo compreender os efeitos do *anti-windup* no controle do sistema. O teste avaliou, em particular, a capacidade do controlador de lidar com a saturação e retornar rapidamente à estabilidade após variações no *set-point*.

Para representar a dinâmica da perturbação, foi aplicado um degrau unitário com duração de 150 segundos na entrada da função de transferência da perturbação representada pela Equação 3.2. Esse sinal foi incorporado ao sistema controlado, como ilustrado nas Figuras 12 e 13, com o objetivo de simular condições de operação onde o sistema está sujeito a distúrbios externo. A Figura 15 destaca o ponto de inserção da perturbação no modelo, evidenciando sua interação com o sistema de controle.

Figura 15 – Dinâmica da perturbação no sistema de controle com duração de 150 segundos a partir do segundo 700 após o início da simulação.

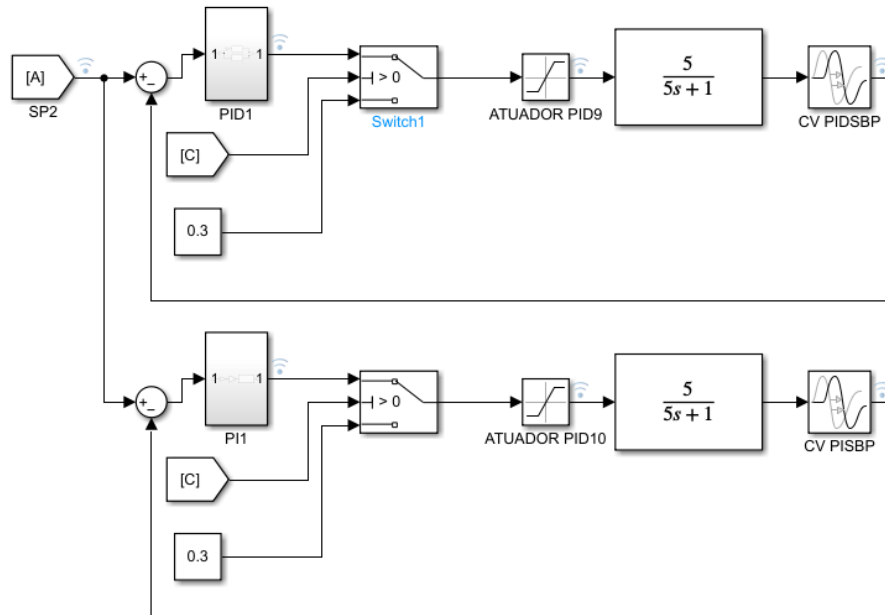


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

3.4.2 Teste *Bumpless-Transfer*

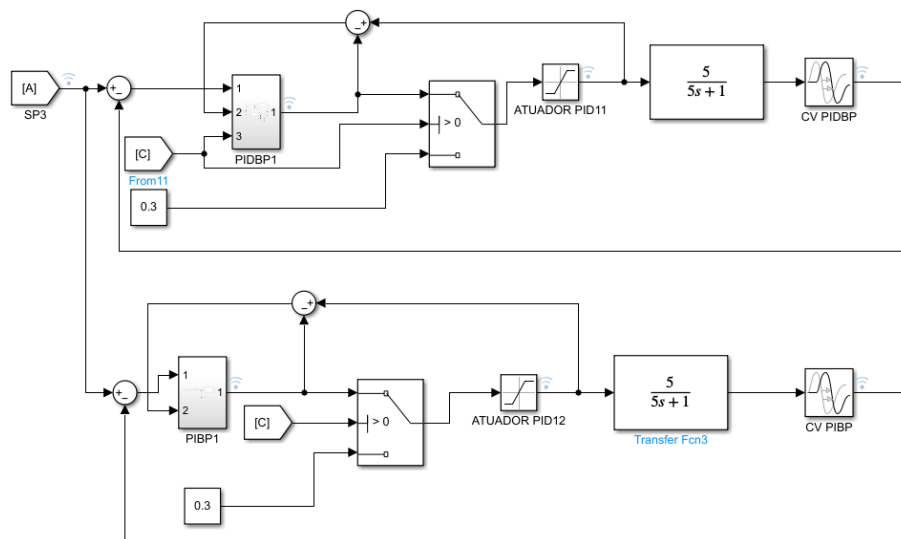
Para a realização dos testes de *bumpless-transfer*, as implementações foram feitas no simulink. Os testes foram divididos em duas categorias: sem *bumpless-transfer* e com *bumpless-transfer*, ambas abordando os controladores PI e PID. A implementação completa dos testes seguiu conforme demonstrado nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Controlador com troca de modos de controle e sem *bumpless-transfer*.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Figura 17 – Controlador com troca de modos de controle e com *bumpless-transfer*.

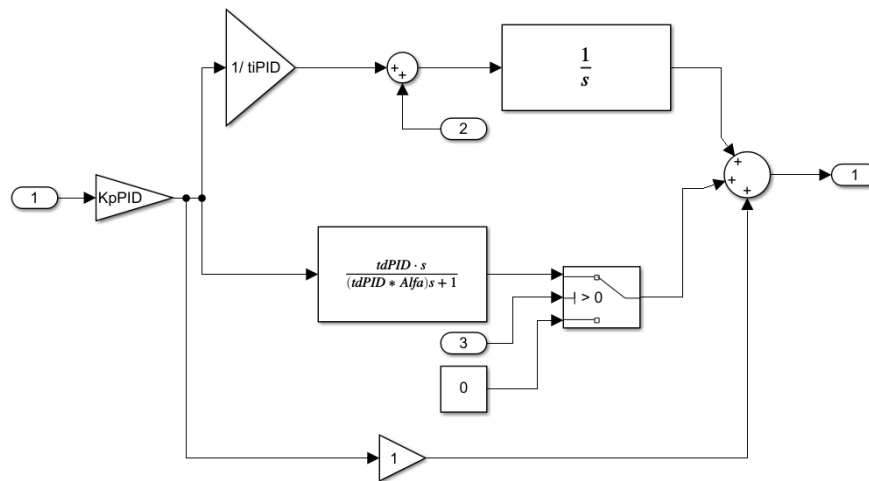


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Para o controlador PID, o sistema de *bumpless-transfer* foi implementado de uma forma que o termo integrador fosse capaz de rastrear o sinal de controle mesmo no modo de controle

automático ou manual. Além disso, para este controlador, também foi utilizado o sistema de *switch* do simulink para zerar o termo derivativo no momento da troca de automático para manual. A Figura 18 demonstra como o sistema foi implementado.

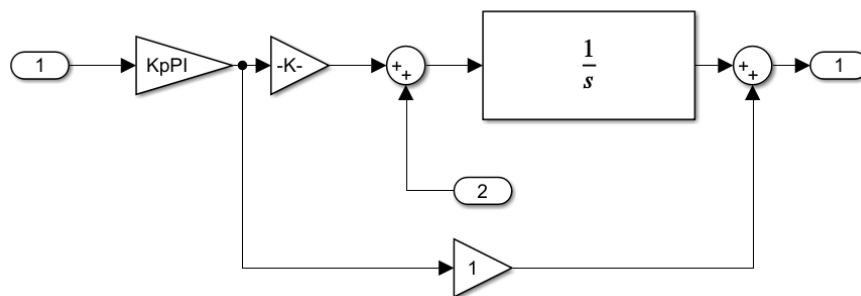
Figura 18 – Implementação do *bumpless-transfer* no controlador PID com o rastreamento do sinal de controle pelo integrador e anulação do termo derivativo.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Para o controlador PI o sistema de rastreamento do sinal de controle também foi implementado entretanto, diferentemente do controlador PID, não há presença de termo derivativo. Devido a isso, o sistema de *bumpless-transfer* ficou restrito somente ao termo integrador do controlador PI, conforme demonstrado na Figura 19.

Figura 19 – Implementação do *bumpless-transfer* no controlador PI com o rastreamento do sinal de controle pelo integrador.

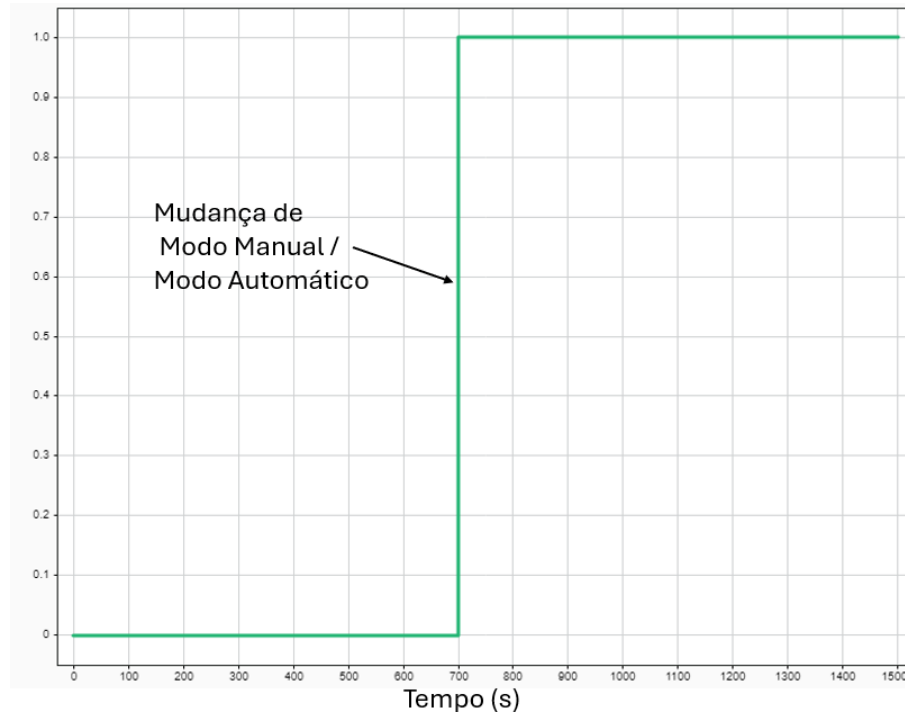


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

A aplicação de *set-point* no sistema, enquanto este estava em modo automático, foi realizada da mesma forma que nos testes com a ação *anti-windup*, conforme ilustrado na Figura 14. Adicionalmente, foi implementado um sistema de troca de comando entre os modos manual e automático, utilizando o bloco *switch* do simulink. Esse bloco permitiu alternar o controle do sistema entre o controlador automático e manual, que, nos testes deste estudo, utilizou um valor

constante de 0,3 como referência. A Figura 20 demonstra o momento da troca de controle de manual para automático.

Figura 20 – Dinâmica de troca de modo manual para automático no segundo 700 após o início da simulação.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Os testes foram iniciados com o sistema operando no modo manual por 700 segundos. Após esse período, o controle foi transferido para o modo automático, permanecendo assim até o final das simulações. Esse procedimento teve como objetivo analisar a resposta do sistema às mudanças de modo, permitindo compreender os efeitos do *bumpless-transfer* no controle do sistema. O teste avaliou, em particular, a capacidade dos controladores em lidar com a troca de modos de controle.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados das simulações realizadas. Os dados são organizados em gráficos e tabelas, com destaque para as diferenças entre os controladores PI e PID, tanto na presença quanto na ausência das técnicas de *anti-windup* e *bumpless-transfer*. São comparados estabilidade e tempos de acomodação em diferentes condições de operação.

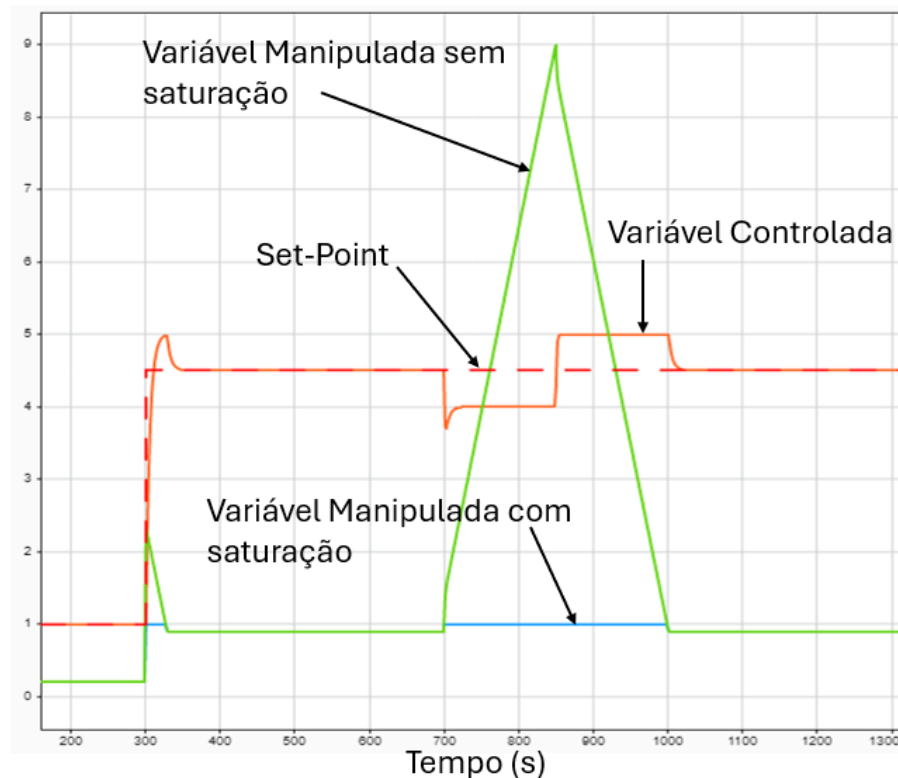
Além disso, o capítulo discute como os controladores se comportaram diante de perturbações e transições de controle. Os resultados numéricos reforçam os benefícios das técnicas implementadas, evidenciando sua importância para melhorar o desempenho e a confiabilidade do sistema em cenários industriais.

4.1 Resultados Testes *Anti-windup*

4.1.1 Controlador PI

A Figura 21 apresenta os testes realizados com o controlador PI, destacando a resposta do controlador (variável manipulada) e da variável controlada, tanto na presença de saturação quanto na ausência de saturação. Nesta análise, o controlador PI foi configurado sem a implementação da ação *anti-windup*.

Figura 21 – Variável manipulada e controlada do controlador PI sem ação *anti-windup*, com mudança de *set-point* no segundo 300 e perturbação de 150 segundos a partir do segundo 700.

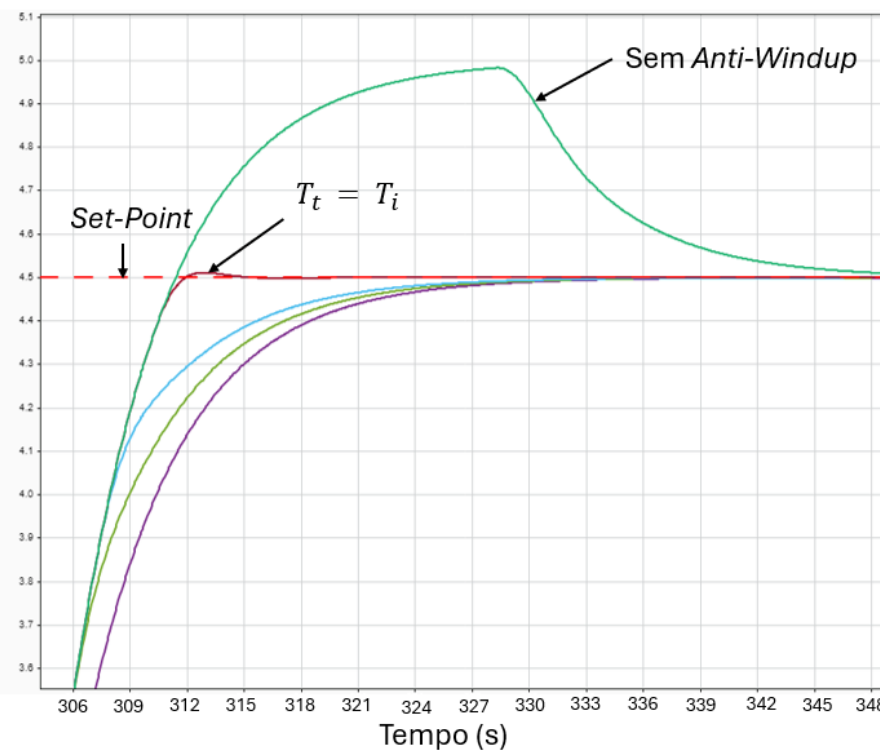


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

PI, considerando os valores de T_i da Tabela 6, estão ilustrados na Figura 22. A Tabela 7 permite avaliar o impacto de cada valor de T_i no desempenho do sistema em condições de saturação, em conjunto com a Figura 22.

Para a mudança de *set-point* o valor de $T_i = T_i$ foi o único que apresentou *overshoot* (aproximadamente 0,2%) e tempo de acomodação curto (18,4 segundos após a mudança de *set-point*). Os demais valores de T_i apresentaram tempos de acomodação semelhantes de aproximadamente 33,3 segundos conforme demonstrado na Figura 23.

Figura 23 – Tempo de acomodação da variável controlada do controlador PI com a ação *anti-windup* para diferentes valores de T_i após a mudança de *set-point*.



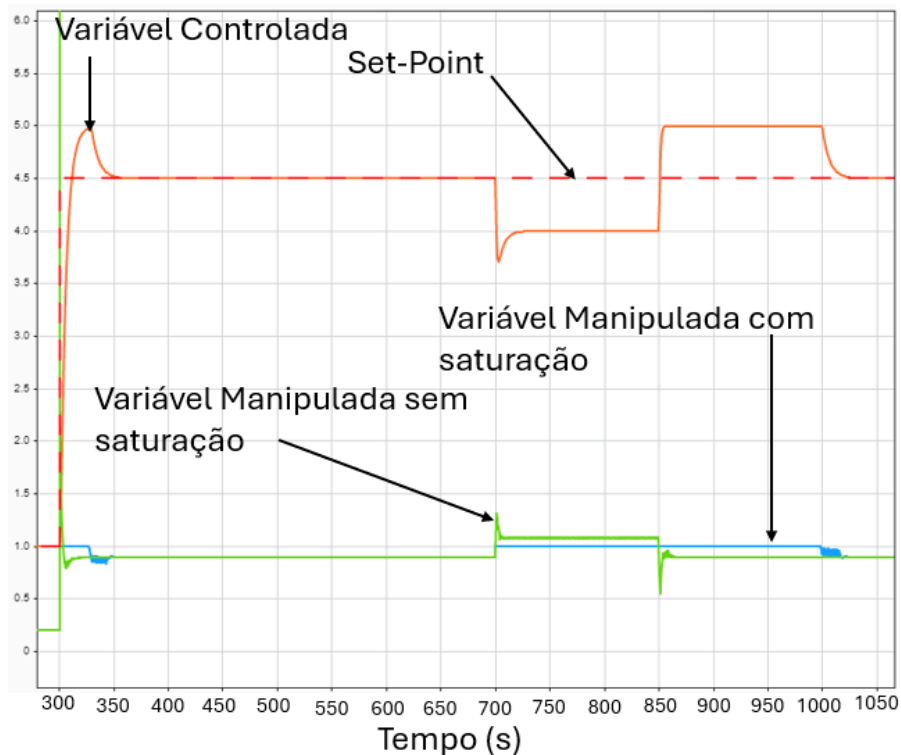
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Também foi realizado testes para um sistema de segunda ordem subamortecido e foi possível observar resultados semelhantes. O controlador PI foi capaz de combater o efeito *windup* tanto na mudança de *set-point* quanto no fim da perturbação.

4.1.2 Controlador PID

A Figura 24 apresenta os testes realizados com o controlador PID, destacando a resposta do controlador (variável manipulada) e da variável controlada, tanto na presença quanto na ausência de saturação. Nesta análise, o controlador PID foi configurado sem a implementação da ação *anti-windup*.

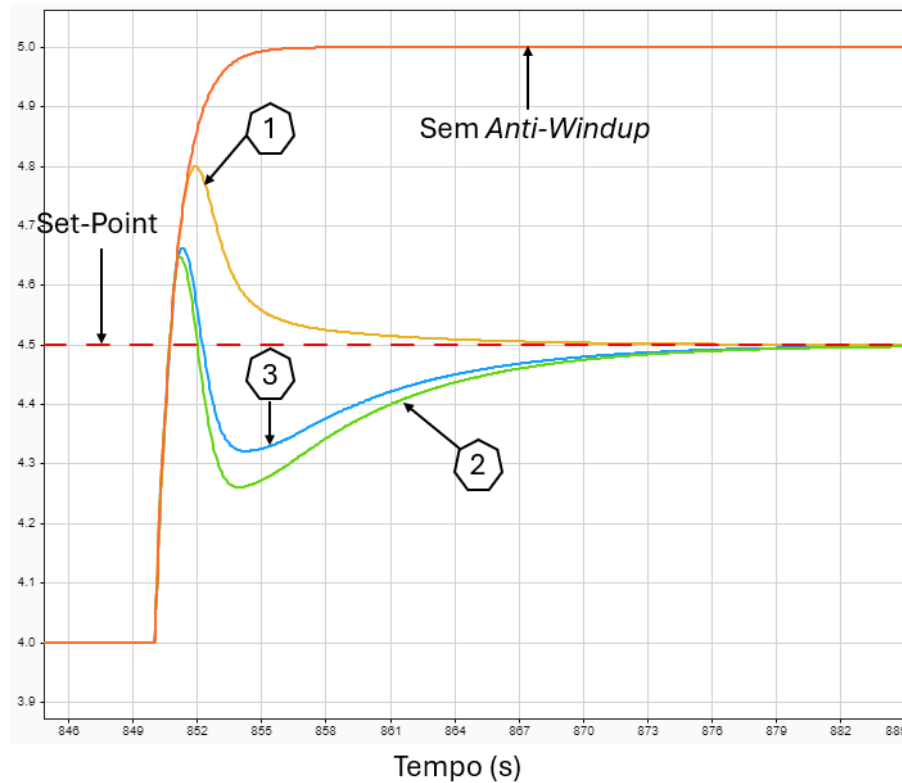
Figura 24 – Variável manipulada e controlada do controlador PID sem ação *anti-windup*, com mudança de *set-point* no segundo 300 e perturbação de 150 segundos a partir do segundo 700.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

A linha azul do gráfico representa a saturação do atuador do sistema que ocorre durante a mudança de *set-point* (segundo 300) e durante a perturbação (segundo 700). Além disso, nota-se o fenômeno de *windup* (linha verde no gráfico), que ocorre em situações de saturação no momento da troca de *set-point* e no momento da perturbação. Quando a perturbação do sistema é removida, aos 850 segundos, observa-se um erro em regime permanente de aproximadamente 165,9 segundos, evidenciando o impacto negativo do *windup* na dinâmica do sistema.

Figura 25 – Tempo de acomodação da variável controlada do controlador PID com a ação *anti-windup* para diferentes valores de T_t .



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Tabela 8 – Comparativo entre tempo para acomodação e *overshoot* da variável controlada do controlador PID, com a ação *anti-windup* para diferentes valores de T_t .

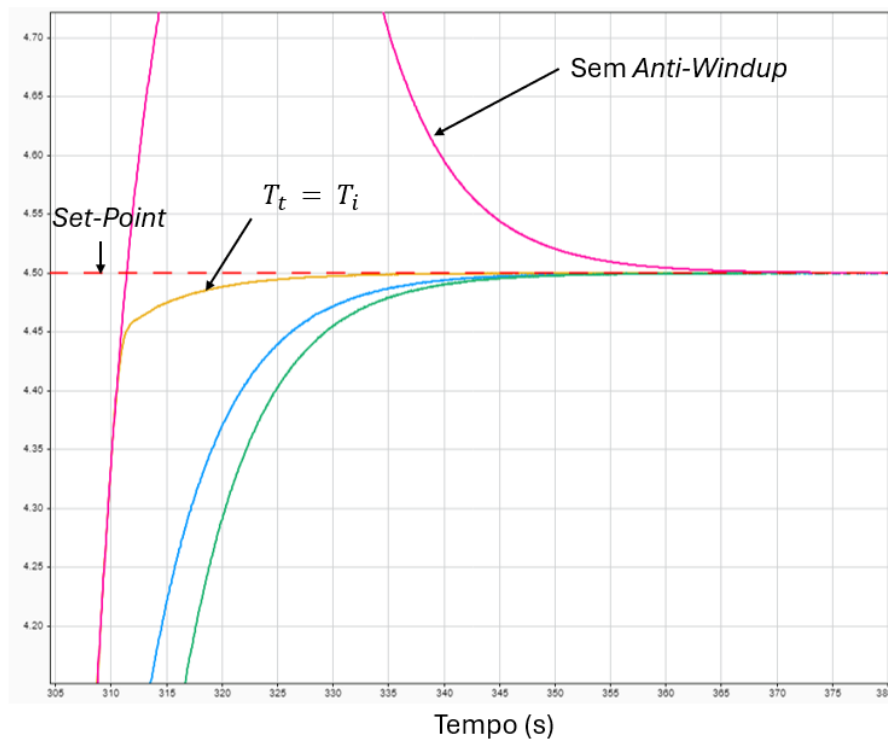
Controlador PID	T_t	<i>Overshoot</i> (%)	Tempo de Acomodação (s)	Tempo relativo (%)
Sem <i>anti-windup</i>	-	-	165,9s	100%
1	$T_t = T_i$	60%	19,3s	11,63%
2	$T_t = \sqrt{T_i T_d}$	32%	29,1s	17,54%
3	$T_t = T_d$	30%	31s	18,68%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Para todos os valores de T_t da Tabela 5, o controlador PID é capaz de combater o efeito *windup*, a diferença se dá no tempo de acomodação do sinal após a remoção da perturbação e no *overshoot* produzido por cada valor de T_t . Os testes envolvendo a ação *anti-windup* no controlador PID, considerando os valores de T_t da Tabela 5, estão ilustrados na Figura 25. A Tabela 8 permite avaliar o impacto de cada valor de T_t no desempenho do sistema em condições de saturação, em conjunto com a Figura 25.

Para a mudança de *set-point* nenhum valor de T_t apresentou *overshoot* porém, o valor de $T_t = T_i$ foi o único que apresentou um tempo de acomodação curto (41,3 segundos após a mudança de *set-point*). Os demais valores de T_t apresentaram tempos de acomodação semelhantes de aproximadamente 52,9 segundos conforme demonstrado na Figura 26.

Figura 26 – Tempo de acomodação do controlador PID com a ação *anti-windup* para diferentes valores de T_i após a mudança de *set-point*.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

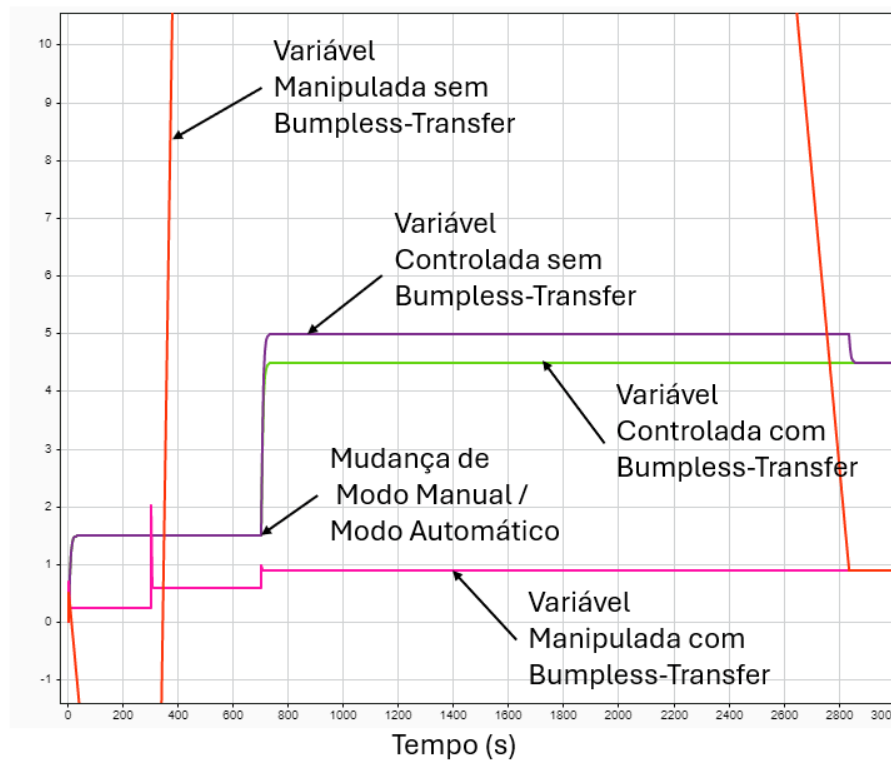
Também foi realizado testes para um sistema de segunda ordem subamortecido e foi possível observar resultados semelhantes. O controlador PID foi capaz de combater o efeito *windup* tanto na mudança de *set-point* quanto no fim da perturbação.

4.2 Resultados Testes *Bumpless-Transfer*

4.2.1 Controlador PI

A Figura 27 apresenta os testes realizados com o controlador PI, evidenciando a resposta do controlador (variável manipulada) e da variável controlada, tanto na presença quanto na ausência do *bumpless-transfer*.

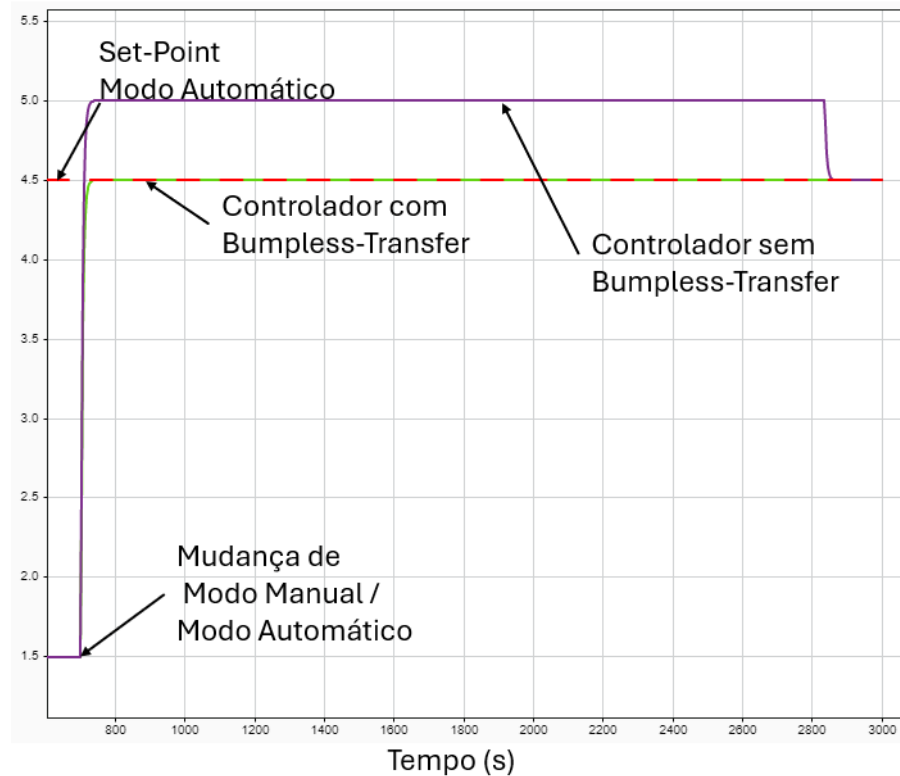
Figura 27 – Variável controlada e manipulada do controlador PI com e sem *bumpless-transfer*.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Observa-se que, sem o *bumpless-transfer*, a variável manipulada apresenta picos indesejados (linha laranja do gráfico), causados pela ausência do rastreamento do termo integral pelo controlador durante a troca de modos. Por outro lado, com a presença do *bumpless-transfer*, esses picos são atenuados, promovendo uma transição mais estável entre os modos de operação quando comparado ao sistema sem o *bumpless-transfer* (linha magenta no gráfico).

A Figura 28 apresenta os resultados dos testes realizados com o controlador PI, destacando a resposta do sistema (variável controlada) nas configurações com e sem o *bumpless-transfer*. Observa-se que o controlador com *bumpless-transfer* foi capaz de acomodar a variável controlada de maneira mais rápida, sem *overshoot* e sem erro em regime permanente, quando comparado ao controlador sem *bumpless-transfer*.

Figura 28 – Variável controlada do controlador PI com e sem *bumpless-transfer*.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

A Tabela 9 fornece uma análise numérica, evidenciando as diferenças de desempenho entre as duas configurações, reforçando os benefícios do uso do *bumpless-transfer* para garantir maior estabilidade e eficiência no controle.

Tabela 9 – Tempo de acomodação da variável controlada do controlador PI em modo automático.

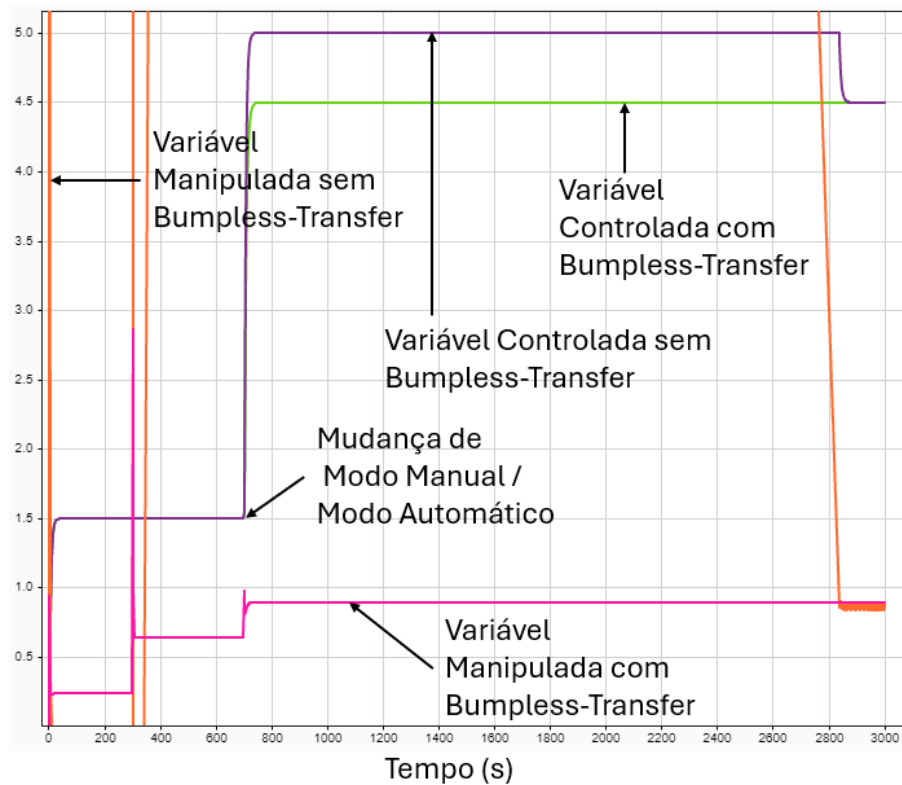
Controlador PI	Tempo de Acomodação (s)	Tempo relativo (%)
Sem <i>bumpless-transfer</i>	2161,1s	100%
Com <i>bumpless-transfer</i>	37,2s	1,72%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Também foi realizado testes para um sistema de segunda ordem subamortecido e foi possível observar resultados semelhantes. O controlador PI com *bumpless-transfer* foi capaz oferecer maior estabilidade na variável controlada e manipulada, bem como menor tempo de acomodação do sinal.

4.2.2 Controlador PID

A Figura 29 apresenta os testes realizados com o controlador PID, evidenciando a resposta do controlador (variável manipulada) e da variável controlada, tanto na presença quanto na ausência do *bumpless-transfer*.

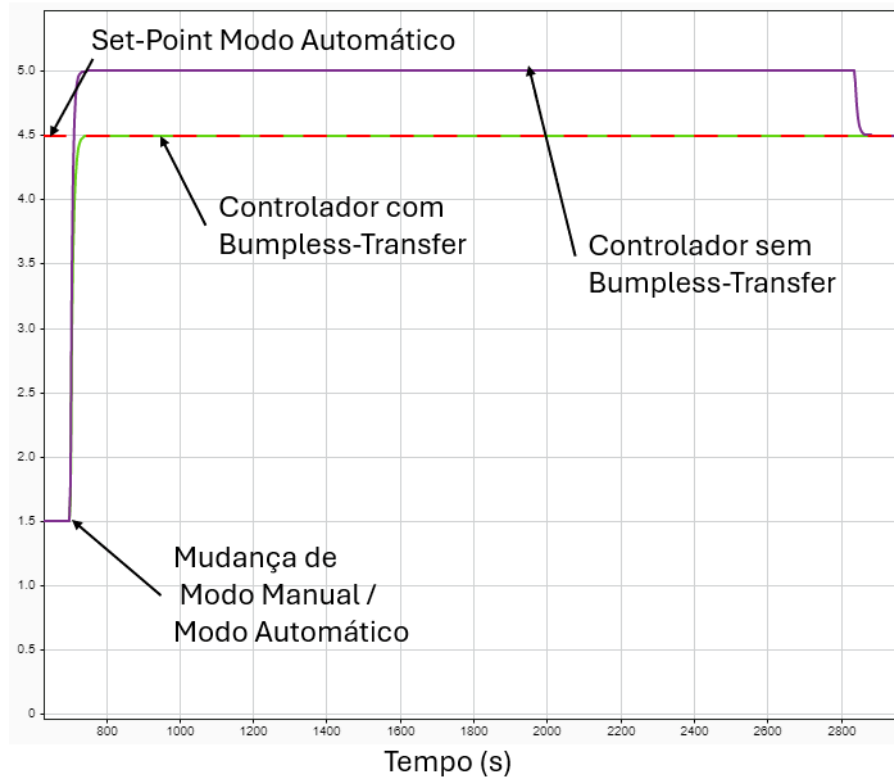
Figura 29 – Variável controlada e manipulada do controlador PID com e sem *bumpless-transfer*.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Observa-se que, sem o *bumpless-transfer*, a variável manipulada apresenta picos indesejados (linha laranja do gráfico), causados pela ausência do rastreamento do termo integral pelo controlador e a presença do termo derivativo durante a troca de modos. Por outro lado, com a presença do *bumpless-transfer*, esses picos são atenuados, promovendo uma transição mais estável entre os modos de operação quando comparado ao sistema sem o *bumpless-transfer* (linha magenta no gráfico).

A Figura 30 apresenta os resultados dos testes realizados com o controlador PID, destacando a resposta do sistema (variável controlada) nas configurações com e sem o *bumpless-transfer*. Observa-se que o controlador com *bumpless-transfer* foi capaz de estabilizar a variável controlada de maneira mais rápida, sem *overshoot* e sem erro em regime permanente, quando comparado ao controlador sem *bumpless-transfer*.

Figura 30 – Variável controlada do controlador PID com e sem *bumpless-transfer*.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

A Tabela 10 fornece uma análise numérica, evidenciando as diferenças de desempenho entre as duas configurações, reforçando os benefícios do uso do *bumpless-transfer* para garantir maior estabilidade e eficiência no controle.

Tabela 10 – Tempo de acomodação do controlador PID em modo automático.

Controlador PID	Tempo de Acomodação (s)	Tempo relativo (%)
Sem <i>bumpless-transfer</i>	2169,1s	100%
Com <i>bumpless-transfer</i>	45,3	2,08%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Também foi realizado testes para um sistema de segunda ordem subamortecido e foi possível observar resultados semelhantes. O controlador PID com *bumpless-transfer* foi capaz oferecer maior estabilidade na variável controlada e manipulada, bem como menor tempo de acomodação do sinal.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou os efeitos de restrições em controladores PI e PID, com ênfase nos fenômenos de *windup* e *bumps*, destacando a implementação das técnicas de *anti-windup* e *bumpless-transfer*. Por meio de simulações realizadas no ambiente simulink do MATLAB®, foi possível avaliar os impactos dessas técnicas em cenários representativos de sistemas industriais, considerando controladores PI e PID em diversas configurações e condições operacionais.

Os resultados demonstraram a importância da implementação do *anti-windup*, especialmente com a utilização da técnica *back-calculation*. Observou-se que, em sistemas sujeitos ao *windup*, a ausência dessa técnica resultou em erros de regime permanente elevados. Por outro lado, a presença do *anti-windup* proporcionou redução nos tempos de acomodação da variável controlada e redução dos *overshoots*. Esses benefícios foram observados tanto para o controlador PI quanto para o controlador PID, destacando a robustez dessa solução. Além disso, por meio da alteração do ganho da variável T_i , foi possível acentuar ou atenuar o efeito *windup* em ambos os controladores. Observou-se que, quanto menor for o valor de T_i , menor será o *overshoot* do sistema após a extinção da perturbação e maior será o tempo de acomodação do sinal. Também constatou-se que, para mudanças de set-point que possam provocar saturação do atuador, valores de T_i mais elevados diminuem o tempo de acomodação do sinal embora possam provocar *overshoots*.

Analisando os resultados numéricos, para o controlador PI, verificou-se uma redução máxima de 96,6% no tempo de acomodação do sinal após o fim da perturbação quando comparado à configuração sem *anti-windup*. De forma semelhante, para o controlador PID, essa redução foi de 88,37%. Esses dados evidenciam a eficácia da técnica *back-calculation* na otimização da resposta do sistema. Entretanto, é importante destacar que os valores do ganho T_i podem variar de acordo com as características do processo controlado e com a necessidade operacional de cada um. Assim, para garantir a eficiência e a segurança do sistema, a definição do valor de T_i deve ser precedida de análises e simulações específicas ao processo, assegurando que o controlador esteja adequadamente ajustado para atender às demandas práticas.

A implementação do *bumpless-transfer* também se mostrou fundamental para garantir transições estáveis entre os modos operação manual e automático. Nos testes realizados, a ausência dessa técnica resultou em picos indesejados na variável manipulada, decorrente da falta de sincronização entre o termo integral e as condições do sistema no momento da troca de modo de operação. Com a implementação do *bumpless-transfer*, esses picos foram atenuados, promovendo maior estabilidade e confiabilidade no desempenho do controlador.

Os resultados numéricos demonstraram que o tempo de acomodação no controlador PI foi reduzido de 2161,1 segundos para apenas 37,2 segundos com o *bumpless-transfer*, o que representa uma queda 98,28% no tempo de acomodação da variável controlada. No controlador PID, a redução foi de 2169,1 segundos para 45,3 segundos, o que representa uma queda 97,92% no tempo de acomodação da variável controlada.

Dessa forma, conclui-se que a aplicação das técnicas de *anti-windup* e *bumpless-transfer* é essencial para a implementação prática e segura dos controladores PI e PID. Essas técnicas permitem contornar restrições comuns nos processos industriais, como a saturação de atuadores e as transições abruptas entre modos de operação, garantindo maior estabilidade, eficiência e confiabilidade no desempenho do sistema. Sua adoção contribui significativamente para a otimização de processos industriais e para a evolução contínua na área de controle e automação.

REFERÊNCIAS

- ASTRÖM, T. H. K. J. **PID Controllers**. The Research Triangle: Instrument Society of America, 1995. ISBN 1-55617-516-7. Disponível em: <https://aiexp.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/07/1-0-1-k-j-astrom-pid-controllers-theory-design-and-tuning-2ed.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- AUTOMANTION, R. **PlantPax Process Control Instructions**: 1756 controllogix, 5069 compactlogix. 2024. 610-677 p.
- AWOUDA, R. M. A. **Refine PID Tuning Rule Using ITAE Criteria**. 2010. Disponível em: <https://web.cecs.pdx.edu/~tymerski/ece451/Refine%20PID%20Tuning%20Rule%20Using%20ITAE%20Criteria.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2025.
- CAMPOS, H. C. G. T. Mario Cesar M. Massa de. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 2008. ISBN 978-85-212-0398-8.
- CHEONG, S.-Y.; SAFONOV, M. G. **Bumpless transfer for adaptive switching controls**. 17th IFAC World Congress, p. 14415–14420, 2008. Disponível em: <https://skoge.folk.ntnu.no/prost/proceedings/ifac2008/data/papers/2555.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- DOROSHENKO, A. **Problems of modelling Proportional–Integral–Derivative controller in automated control systems**. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318111831_Problems_of_modelling_Proportional-Integral-Derivative_controller_in_automated_control_systems. Acesso em: 27 nov. 2024.
- FREITAS, B. S. de. **Controle de Nível de Dois Tanques Acoplados com Implementação de Controle Proporcional e Integral em Controladores Lógicos Programáveis**. 2019. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/5605/1/MONOGRAFIA_ControlaN%C3%ADvelDois.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.
- GARCIA, A. K. D. **PID Controller Design with Constraints on Sensitivity Functions Using Loop Slope Adjustment**. 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/S-Dormido/publication/224639202_PID_controller_design_with_constraints_on_sensitivity_functions_using_loop_slope_adjustment/links/00b4952b577cae1b90000000/PID-controller-design-with-constraints-on-sensitivity-functions-using-loop-slope-adjustment.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.
- IRIONDO, M. M. N. **Bumpless Transfer Multi-controller Architecture for Switched-mode Processes**. 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/13857242/Bumpless_transfer_multi_controller_architecture_for_switched_mode_processes. Acesso em: 16 out. 2024.
- JALIL, M. T. M. **Back calculation anti windup pid controller on several well-known tuning method for glycerin bleaching process temperature regulation**. International Journal of Integrated Engineering, p. 39–50, 2014. Disponível em: <https://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/download/1033/689>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- NOVUS. **Controle PID Básico**. 2003. Disponível em: <https://cdn.novusautomation.com/noticias/ArtigoPIDBasicoNovus.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2024.

OLIVEIRA, M. A. de. **Sintonia de Controladores PID Robustos por Meta-heurísticas e LMI**. 2018. Disponível em: Acesso em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/796/1/MONOGRAFIA_SintoniaControladoresPID.pdf. 8 dez. 2024.

PADULA, A. V. F. **On the Anti-windup Schemes for Fractional-order PID Controllers**. 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6489758/>. Acesso em: 8 dez. 2024.

PENG, D. V. Y.; HANUS, R. **Anti-windup, bumpless, and conditioned transfer techniques for pid controllers**. IEEE Control Systems, p. 48–57, 1996. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/3206463_Antiwindup_Bumpless_and_Conditioned_Transfer_Techniques_for_PID_Controllers. Acesso em: 8 dez. 2024.

PONTES, F. G. **Projeto de controladores PID com ação derivativa filtrada**. 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/riufcg/18631/1/FELIPE+GOMES+PONTES+-+TCC+ENG.+EL%C3%89TRICA+2016.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2024.

TARBOURIECH, M. T. S. **Anti-windup design: an overview of some recent advances and open problems**. p. 1–34, 2007. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/ecb4/feba762ce24c9e52cdcfc1897c2453f461da.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2024.

WERLING, M. K. M. **Different Schemes for Bumpless Manual/Automatic Transfer**. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Michael-Kaufmann-8/publication/277075296_DIFFERENT_SCHEMES_FOR_BUMPLESS_MANUALAUTOMATIC_TRANSFER/links/5560803b08ae6f4dcc93bed8/DIFFERENT-SCHEMES-FOR-BUMPLESS-MANUAL-AUTOMATIC-TRANSFER.pdf. Acesso em: 8 dez. 2024.