

Autobalanceamento de jogos digitais a partir do uso de Controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Title: Dynamic Difficulty Adjustment Using Proportional–Integral–Derivative (PID) Controllers

Cristiano Barroso Serra e Tadeu Moreira de Classe

¹Grupo de Pesquisa em Jogos para Contextos Complexos (JOCCOM)
Programa de Pós-Graduação em Informática (PPGI)
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO)
Rio de Janeiro – RJ – Brasil

cristianoserra@edu.unirio.br, tadeu.classe@uniriotec.br

Abstract. Introduction: *Dynamic Difficulty Adjustment (DDA) personalizes challenges in digital games. Despite the growth of the gaming market, no studies were found employing Proportional–Integral–Derivative (PID) controllers in this context.*

Objective: *To evaluate the feasibility and effects of PID controllers, combined with Game Analytics, for real-time difficulty self-balancing.*

Methodology: *The research followed these steps: (1) Problem Identification – a Systematic Literature Review confirmed the gap; (2) Objective Definition; (3) Design and Development of two prototypes — *InfinityFire* (remote PID using a Python server) and *SpacePilot* (local PID using Unity); (4) Demonstration and Evaluation with 163 players across three modes (Easy, Linear, PID), analyzing telemetry and reaction questionnaires; (5) Communication – scientific dissemination.*

Results: *The PID controller achieved statistically similar results to the linear method and outperformed other approaches.*

Conclusion: *PID controllers prove to be a promising and low-cost alternative for DDA; future work should expand sample sizes, apply the method in commercial games, and combine PID with machine learning techniques.*

Keywords Game Analytics, Dynamic Difficulty Adjustment, Autobalancing, PID Controller

Resumo. Introdução: *O ajuste dinâmico de dificuldade (DDA) personaliza desafios em jogos digitais, apesar do crescimento no mercado de jogos, não foram encontrados estudos que empreguem controladores Proporcional–Integral–Derivativo (PID) nesse contexto.*

Objetivo: *Avaliar a viabilidade e os efeitos de controladores PID, aliados a Game Analytics, para autobalanceamento de dificuldade em tempo real.*

Metodologia: *Seguiu-se o ciclo: (1) Identificação do Problema – um Mapeamento Sistemático da Literatura confirmou a lacuna; (2) Definição de Objetivos; (3) Projeto e Desenvolvimento de dois protótipos — *InfinityFire* (PID remoto em servidor python) e *SpacePilot* (PID local em Unity); (4) Demonstração e Avaliação com 163 jogadores em três modos (Fácil, Linear, PID), analisando telemetria e questionário de reação; (5) Comunicação –*

divulgação científica.

Resultados: O PID atingiu resultados estatisticamente semelhantes ao método linear e superior ao demais métodos. **Conclusão:** Controladores PID mostram-se alternativa promissora e de baixo custo para DDA; recomenda-se ampliar amostras, aplicar em jogos comerciais e combinar PID a técnicas de machine learning.

Palavras-Chave Game Analytics, DDA, Autobalanceamento, Controlador PID

1. Introdução

A indústria de jogos eletrônicos superou os US\$196 bilhões em receita global em 2022, impulsionada pelo crescimento do mobile gaming e pela maior acessibilidade a plataformas de jogo [IFPI 2024]. Atualmente, esse setor já ultrapassa os mercados cinematográfico e musical, assumindo um papel estratégico tanto no campo econômico quanto cultural [Arif et al. 2024, Johnson e Lee 2022]. No entanto, a literatura acadêmica não acompanha esse avanço em termos de desenvolvimento de mecanismos de engajamento, coleta de dados comportamentais e técnicas de adaptação dinâmica [Serra e de Classe 2023].

Ainda há escassez de estudos que integrem *Game Analytics* com estratégias de autobalanceamento capazes de ajustar, em tempo real, a dificuldade de um jogo conforme o desempenho individual do jogador. Essa ausência compromete a criação de experiências personalizadas que maximizem a retenção, o aprendizado e outras finalidades além do puro entretenimento [Arif et al. 2024, Janakiraman et al. 2021]. Além disso, persistem desafios técnicos e éticos, como a escolha dos algoritmos mais eficazes e o uso responsável dos dados dos usuários [Mortazavi et al. 2024].

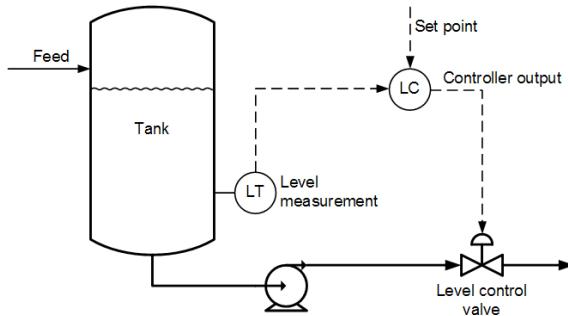
Diante desse cenário, esta dissertação propõe o uso de controladores Proporcional–Integral–Derivativo (PID), amplamente utilizados em sistemas de controle automático, como solução para balanceamento dinâmico em jogos digitais. Os controladores PID permitem manter variáveis de interesse — como pontuação, velocidade de inimigos ou taxa de geração de obstáculos — ajustadas de forma contínua ao desempenho do jogador.

A fórmula geral do controlador PID combina três componentes: proporcional (K_p), integral (K_i) e derivativo (K_d), conforme a equação:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Em que $e(t)$ representa o erro entre o valor desejado e o valor atual da variável controlada. Essa abordagem, consagrada em contextos industriais como controle de pressão, temperatura e nível [Aboelhassan et al. 2020, Vilanova e Visoli 2017, Vilar e Souza 2019], é adaptada aqui ao contexto dos jogos, oferecendo uma forma responsiva e automatizada de ajustar a experiência de jogo.

No controle de nível de um tanque, o controlador PID pode atuar para manter o líquido na altura desejada (*setpoint*), ajustando automaticamente a válvula de entrada conforme a diferença entre o valor atual e o desejado. O sensor mede o nível, envia ao controlador, que calcula o erro e corrige a válvula proporcionalmente (P), integralmente

Figura 1. Controle de nível PID

(I) considerando o histórico e de forma derivativa (D) prevendo a tendência da variação. Esse processo é ilustrado na Figura 1, mostrando como os sinais fluem do sensor à válvula para estabilizar o sistema.

O estudo segue cinco etapas principais: (i) revisão sistemática da literatura para identificação de lacunas; (ii) definição da arquitetura de autobalanceamento baseada em PID; (iii) desenvolvimento de um jogo-protótipo com monitoramento integrado e painel de *Game Analytics*; (iv) experimentação controlada com coleta de dados de *gameplay*; e (v) análise estatística comparando a eficácia do PID em relação a métodos tradicionais. Os resultados são analisados com base em métricas de engajamento, desempenho e percepção dos jogadores, apontando limitações e sugestões para futuras pesquisas.

2. Relevância e Originalidade

O autobalanceamento dinâmico é um desafio central em game design, essencial para manter jogadores engajados em diferentes níveis de habilidade [Yuan et al. 2021]. Ao integrar controladores PID com técnicas de *Game Analytics*, esta pesquisa propõe uma solução de ajuste em tempo real com implementação simples, resposta rápida e suporte orientado por dados. Os testes com os protótipos InfinityFire (PID remoto) e SpacePilot (PID local) evidenciaram resposta eficaz do sistema de dificuldade, com impacto positivo na experiência do usuário.

Este é um estudo inovador por empregar controladores PID no contexto de *Dynamic Difficulty Adjustment* (DDA) em jogos digitais, substituindo abordagens tradicionais por uma técnica consolidada em controle industrial [Vilanova e Visoli 2017]. A contribuição destaca-se por: (i) adaptar o PID ao domínio dos jogos; (ii) validar arquiteturas remota e local com coleta de dados via *Game Analytics*; e (iii) demonstrar, com base estatística, ganhos de equilíbrio frente aos métodos “Fácil” e “Linear”. O resultado é um artefato replicável, de baixo custo computacional, que preenche lacuna apontada no mapeamento sistemático da literatura e oferece novo referencial à área de Jogos Digitais.

3. Avaliação e Resultados

Inicialmente, foi realizado um Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL) com 1532 artigos analisados, permitindo identificar trabalhos que empregam técnicas variadas, como heurísticas, *machine learning* e algoritmos genéticos, em abordagens de *Dynamic Difficulty Adjustment* (DDA). Constatou-se que não há estudos descrevendo a aplicação

de controladores PID em autobalanceamento. Este estudo avaliou dois protótipos: protótipo exploratório para verificar a viabilidade de implementação do PID para autobalanceamento no jogo *InfinityFire* com PID remoto e o segundo protótipo, mais robusto, com o jogo *SpacePilot* com utilização do PID local integrado ao jogo:

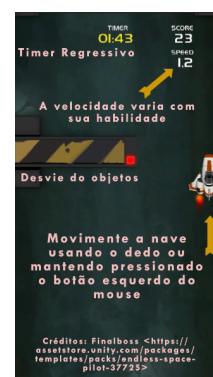
InfinityFire – PID remoto (Figura 2) Servo–PID em nuvem ajusta *speed* e tempo de *spawn* com alvo de *Score* = 6; comparado a um balanceamento linear (tradicional).

SpacePilot – PID local (Figura 3) Controlador PID embutido na Unity, com comparação de resultados entre: autobalanceamento *Fácil* (velocidade fixa) e *Linear* ($velocidade = \frac{1}{6} \times Score$) e PID.

Figura 2. Jogo InfinityFire



Figura 3. Jogo SpacePilot



Esta seção resume, de forma objetiva, os achados empíricos dos dois protótipos – **InfinityFire** (PID remoto) e **SpacePilot** (PID local) – em relação aos métodos de平衡amento avaliados.

A Tabela 1 apresenta o comparativo de correlação (velocidade *vs.* pontuação), aprovação do método de autobalanceamento entre *InfinityFire* (PID remoto *vs.* Linear)

Tabela 1. InfinityFire – indicadores comparativos

Métrica	Linear	PID
Correlação Score–Speed (Spearman)	0.96	0.93
Correlação (acima do setpoint)	0.87	0.78
% sessões “estabilizadas” (Score 6)	54 %	72 %
Aprovação da dificuldade ¹	64 %	68 %

Tabela 2. SpacePilot – resultados quantitativos

Indicador	Fácil	Linear	PID
Média de Score	28.1	36.7	46.6
Desvio-padrão (Score)	12.3	14.8	16.4
Correlação Score–Speed (Spearman)	n/a	0.96	0.84
Acertos/Erros (ratio)	1.57	1.94	2.02
Velocidade média (u.)	1.00	3.72	4.18
Mann-Whitney <i>p</i> (Score PID vs Lin)	–	–	0.24
Mann-Whitney <i>p</i> (Speed PID vs Lin)	–	–	<0.001

O PID manteve o alvo de pontuação (6) em maior número de sessões e amortizou oscilações acima do *setpoint* (queda de correlação para 0.78). Jogadores relataram experiência ligeiramente mais adequada que no Linear. A Tabela 2 apresenta o comparativo estatístico de pontuação(Score), acertos x erros velocidade entre *SpacePilot* (PID local *vs.* Linear *vs.* Fácil).

Por fim, a Tabela 3 apresenta o comparativo de faixa de pontuação entre *SpacePilot* (PID local *vs.* Linear *vs.* Fácil).

Tabela 3. SpacePilot – distribuição de Score por faixa

Faixa (pts)	0–20	20–40	40–60	>60
Fácil	5 %	55 %	33 %	7 %
Linear	8 %	60 %	26 %	6 %
PID	3 %	36 %	42 %	20 %

Tabela 4. Feedback subjetivo por modo de balanceamento

Categoría	Fácil	Linear	PID
Avaliação “apropriado”	50 %	64 %	68 %
Avaliação “difícil”	37 %	11 %	9 %
Respostas negativas sobre ajuste	27 %	29 %	18 %

Não houve diferença significativa de Score (PID vs. Linear), mas a velocidade média foi estatisticamente maior no PID ($p < 0.001$), confirmando resposta dinâmica do controlador. O PID transferiu 20 % das sessões para a faixa >60 pontos, enquanto Linear concentrou-se em 20–40 pts.

A Tabela 4 apresenta a avaliação qualitativa entre os métodos no jogo *SpacePilot* com a Percepções dos Jogadores (163 respondentes).

O estudo aplicou controladores PID em dois jogos: InfinityFire (remoto) e SpacePilot (local). No InfinityFire, a infraestrutura em nuvem viabilizou escalabilidade e análise em tempo real dos dados; no SpacePilot, a solução local com Unity usou Google Sheets para coleta de métricas. O PID demonstrou ajustes mais dinâmicos que o método linear, mas sem diferenças estatisticamente significativas nos acertos e erros, embora com reação levemente superior.

4. Considerações Finais

A solução proposta — *Game Analytics*, cálculo em tempo real via controlador PID e retroalimentação de parâmetros de jogo — pode ser usado com qualquer motor de jogo (*game engine*). A pesquisa originou 2 artigos completos em conferências de Jogos [Serra e de Classe 2023]; Ao reduzir tempo de ajuste manual e oferecer desafio sob medida, o modelo PID–Analytics: abrem perspectivas para o engajamento em contextos além do entretenimento como em jogos com propósito. A proposta se alinha ao GranDGesBr, oferecendo evidência empírica de que controladores tradicionais de Automação podem compor soluções viáveis e otimizadas de baixo custo computacional, interpretabilidade e facilidade de implementação; Com sugestão para estudos futuros:(i) testar a arquitetura em jogos multijogador, (ii) hibridizar PID com *machine learning* para refino automático de ganhos K_p , K_i , K_d , (iii) estender o modelo a novos cenários. Apesar das limitações observadas, os achados reforçam a viabilidade do autobalanceamento dinâmico PID como ferramenta adaptativa, capaz de personalizar experiências de jogo e potencializar o aprendizado dos usuários. A pesquisa abre caminho para investigações futuras, consolidando uma base metodológica e experimental sólida para o avanço na área de jogos digitais com sistemas adaptativos.

Referências

- Aboelhassan, A., Abdelgeliel, M., Zakzouk, E. E., e Galea, M. (2020). Design and implementation of model predictive control based pid controller for industrial applications. *Energies*, 13(24):6594.
- Arif, Y. M., Ayunda, N., Diah, N. M., e Garcia, M. B. (2024). A systematic review of serious games for health education: Technology, challenges, and future directions. *Transformative Approaches to Patient Literacy and Healthcare Innovation*, pages 20–45.

IFPI (2024). Global music report 2024 – state of the industry. Apresenta que as receitas globais de música gravada somaram US\$ 28,6 bilhões em 2023, crescimento de 10,2 % em relação a 2022.

Janakiraman, S., Watson, S. L., Watson, W. R., e Newby, T. (2021). Effectiveness of digital games in producing environmentally friendly attitudes and behaviors: A mixed methods study. *Computers & Education*, 160:104043.

Johnson, M. e Lee, A. (2022). Cultural significance and economic growth: A study of the gaming industry's rise. *International Journal of Cultural Studies*, 15(2):150–170.

Mortazavi, F., Moradi, H., e Vahabie, A.-H. (2024). Dynamic difficulty adjustment approaches in video games: a systematic literature review. *Multimedia Tools and Applications*, 83(35):83227–83274.

Serra, C. B. e de Classe, T. M. (2023). Análise e visualização de dados em jogos de treinamento de situações de risco na indústria-um estudo em mapeamento sistemático.

Vilanova, R. e Visioli, A. (2017). The proportional-integral-derivative (pid) controller. Wiley.

Vilar, P. e Souza, F. (2019). Aplicação de controladores pid em sistemas de autobalanceamento para jogos digitais. *Revista de Engenharia de Controle*, 34(2):98–112.

Yuan, C., Xue, D., e He, X. (2021). A balancing strategy for ambidextrous learning, dynamic capabilities, and business model design, the opposite moderating effects of environmental dynamism. *Technovation*, 103:102225.