

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA

BERNARDO COCO DA SILVA

**AJUSTE AUTOMÁTICO DE CONTROLADORES PID UTILIZANDO
TÉCNICAS COMPUTACIONAIS INTELIGENTES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2015

BERNARDO COCO DA SILVA

**AJUSTE AUTOMÁTICO DE CONSTROLADORES PID UTILIZANDO
TÉCNICAS COMPUTACIONAIS INTELIGENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina TCC 2, do Curso de Engenharia Industrial Elétrica do Departamento de Eletrotécnica (DAELE) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Ravazzi Pires da Silva .

CORNÉLIO PROCÓPIO
2015



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Industrial Elétrica**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bernardo Coco da Silva

Ajuste automático de controladores PID utilizando técnicas computacionais inteligentes

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 13/11/2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Industrial Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Emerson Ravazzi Pires da Silva - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Marcos Banheti Rabello Vallim - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Antes de qualquer menção, gostaria de agradecer a Deus pela minha saúde, que possibilitou que eu buscasse todos os outros aspectos em minha vida.

Agradeço a meu pai, Claudio, por todo o apoio em todas as etapas desta fase e por todo incentivo aplicado. Agradeço também minha mãe, Sandra, pelo infinito carinho e amor. Agradeço também a minha namorada Fabiana, companheira e apoiadora, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, dando forças nos mais difíceis.

Reverencio a toda minha família, em especial minha tia Elisabete, pilar importantíssimo na educação de muitos jovens, inclusive na minha. Obrigado pelo constante incentivo. Agradeço a todos os verdadeiros amigos, irmãos de consideração, pelo suporte nas etapas finais.

Deixo também o meu obrigado ao Prof. Dr. Emerson Ravazzi Pires da Silva pela orientação em todas as etapas deste trabalho e por aceitar me ajudar neste desafio. Gostaria de deixar registrado também o meu agradecimento ao Prof. Dr. Márcio Mendonça pela inicial orientação que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

“Um homem precisa viajar. Por sua conta, não por meio de histórias, imagens, livros ou TV. Precisa viajar por si, com seus olhos e pés, para entender o que é seu. Para um dia plantar as suas próprias árvores e dar-lhes valor. Conhecer o frio para desfrutar o calor. E o oposto. Sentir a distância e o desabrigo para estar bem sob o próprio teto. Um homem precisa viajar para lugares que não conhece para quebrar essa arrogância que nos faz ver o mundo como o imaginamos, e não simplesmente como é ou pode ser. Que nos faz professores e doutores do que não vimos, quando deveríamos ser alunos, e simplesmente ir ver.”

Amyr Klink

RESUMO

SILVA, Bernardo C. da. Controle PID adaptativo sintonizado por técnicas computacionais inteligentes. 2015. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Industrial Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Este trabalho apresenta um estudo comparativo dos resultados adquiridos da aplicação de sistemas inteligentes em um algoritmo de ajuste automático dos parâmetros de controladores PID. As plantas utilizadas nas simulações contemplam sistemas dinâmicos genéricos de terceira, quarta e quinta ordens e um processo de fermentação alcoólica. Para aplicação deste algoritmo, os sistemas dinâmicos utilizados necessitam ser estáveis para ganho proporcional próximo de zero e alcançarem oscilação sustentada com seu incremento. Neste contexto, foram desenvolvidas rotinas de ajuste que utilizam Sistema *Fuzzy* e os Mapas Cognitivos *Fuzzy* como ferramenta para tomada de decisão na adaptação dos parâmetros. Este trabalho também apresenta a fundamentação sobre o controle PID e técnicas de ajuste, sistemas dinâmicos e sistemas inteligentes. Após o desenvolvimento das rotinas, foram aplicadas as simulações computacionais, utilizando o Matlab® Simulink, de todos os sistemas dinâmicos para cada ferramenta inteligente. Por fim, são apresentados os resultados das simulações, onde comprovou-se a capacidade adaptativa do algoritmo, comparando a eficiência da aplicação de ambos sistemas inteligentes.

Palavras chave: Ajuste Automático. Sistemas de Controle. Controlador PID. Sistemas Inteligentes.

ABSTRACT

SILVA, Bernardo C. da. Adaptive PID control tuned by intelligent computational techniques. 2015. F105. Final paper – Degree in Electrical Industrial Engineering, Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

This work presents a comparative study of results obtained from the application of intelligent systems in an automatic tuning algorithm of PID controller parameters. The plants used in the simulations include generic dynamical systems of third, fourth and fifth orders and an alcoholic fermentation process. For applying in this algorithm, the dynamic systems have to be stable for proportional gain near zero and achieve sustained oscillation with its increase. In this context, setting routines were developed using Fuzzy System and Fuzzy Cognitive Maps as a tool for decision making in adapting parameters process. It was presented the foundation on the PID control and tuning techniques, dynamic systems and intelligent systems. After the development of the routines, the computer simulations were applied using Matlab® Simulink, using all dynamic systems for each intelligent tool. Finally, the results of the simulations are presented, which proved the ability of the adaptive algorithm by comparing the efficiency of the application of both intelligent systems.

Keywords: Automatic setting. Control Systems. PID Controller. Intelligent Systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – DIAGRAMA REPRESENTATIVO DO CONTROLADOR PID	24
FIGURA 2 – RESPOSTA TÍPICA DE UM SISTEMA SUBMETIDO A UMA ENTRADA DEGRAU UNITÁRIO.....	26
FIGURA 3 – DIAGRAMA DE LUGAR DAS RAÍZES DO SISTEMA DA EQUAÇÃO (10).....	28
FIGURA 4 – RESPOSTA DO SISTEMA DE ACORDO COM O AUMENTO DO GANHO PROPORCIONAL	29
FIGURA 5 – SISTEMA EM OSCILAÇÃO SUSTENTADA.....	30
FIGURA 6 – MECANISMO DE ADAPTAÇÃO.....	33
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO UTILIZANDO CONCEITOS ARBITRÁRIOS PARA A LÓGICA CLÁSSICA (À ESQUERDA) E PARA O SISTEMA FUZZY (À DIREITA)	34
FIGURA 8 – MODELO DE KING E MANDANI.....	35
FIGURA 9 – ESTRUTURA EM GRAFO (FCM).....	36
FIGURA 10 – SISTEMA ADAPTATIVO POR FUZZY E FCM	38
FIGURA 11 – LUGAR DAS RAÍZES DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM.....	40
FIGURA 12 – LUGAR DAS RAÍZES DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM COM ZERO EM $S=2$	41
FIGURA 13 – LUGAR DAS RAÍZES DO SISTEMA DE QUARTA ORDEM.....	41
FIGURA 14 – LUGAR DAS RAÍZES DO SISTEMA DE QUARTA ORDEM COM ZERO EM $S = -0,285$	42
FIGURA 15 – LUGAR DAS RAÍZES DO SISTEMA DE QUINTA ORDEM.....	43
FIGURA 16 – LUGAR DAS RAÍZES DO SISTEMA DE QUINTA ORDEM COM ZERO EM $S = -2$	44
FIGURA 17 – MODELO DO TANQUE DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA	45
FIGURA 18 – ESTRUTURA UTILIZADA NO SIMULINK	47
FIGURA 19 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO PROPOSTO.....	48
FIGURA 20 – FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE ENTRADA “OVERSHOOT”.....	50
FIGURA 21 – FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA “TR” E “TS”	51
FIGURA 22 – FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE SAÍDA “INCREMENTO DE KP”	52
FIGURA 23 – FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE SAÍDA “INCREMENTO DE KD”	52
FIGURA 24 – FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE SAÍDA “INCREMENTO DE KI”	53

FIGURA 25 – MAPA COGNITIVO <i>FUZZY</i>	55
FIGURA 26 – SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM EM OSCILAÇÃO SUSTENTADA	57
FIGURA 27 – COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	58
FIGURA 28 – COMPARAÇÃO DA CAMPANHA DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	59
FIGURA 29 – COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM UTILIZANDO FCM.....	60
FIGURA 30 – COMPARAÇÃO DA CAMPANHA DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	61
FIGURA 31 – SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM (COM ZERO) EM OSCILAÇÃO SUSTENTADA.....	62
FIGURA 32 – COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	63
FIGURA 33 – COMPARAÇÃO DA CAMPANHA DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	64
FIGURA 34 – COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO FCM.....	65
FIGURA 35 – COMPARAÇÃO DA CAMPANHA DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO FCM.....	66
FIGURA 36 – OSCILAÇÃO SUSTENTADA PARA O SISTEMA DE QUARTA ORDEM.....	67
FIGURA 37 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES PARA O SISTEMA DE QUARTA ORDEM UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	68
FIGURA 38 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES NA CAMPANHA PARA O SISTEMA DE QUARTA ORDEM UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	69
FIGURA 39 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES PARA O SISTEMA DE QUARTA ORDEM UTILIZANDO FCM.....	70
FIGURA 40 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES NA CAMPANHA PARA O SISTEMA DE QUARTA ORDEM UTILIZANDO FCM.....	71
FIGURA 41 – OSCILAÇÃO SUSTENTADA PARA O SISTEMA DE QUARTA ORDEM COM ZERO.....	72
FIGURA 42 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES PARA O SISTEMA DE QUARTA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	73
FIGURA 43 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES NA CAMPANHA PARA O SISTEMA DE QUARTA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	74
FIGURA 44 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES PARA O SISTEMA DE QUARTA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO FCM.....	75
FIGURA 45 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES NA CAMPANHA PARA O SISTEMA DE QUARTA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO FCM.....	76

FIGURA 46 – OSCILAÇÃO SUSTENTADA PARA O SISTEMA DE QUINTA ORDEM	77
FIGURA 47 – COMPARAÇÃO DAS RESPOSTAS DOS AJUSTES PARA O SISTEMA DE QUINTA ORDEM UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	78
FIGURA 48 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES NA CAMPANHA PARA O SISTEMA DE QUINTA ORDEM UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	79
FIGURA 49 – COMPARAÇÃO DAS RESPOSTAS DOS AJUSTES PARA O SISTEMA DE QUINTA ORDEM UTILIZANDO FCM.....	80
FIGURA 50 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES NA CAMPANHA PARA O SISTEMA DE QUINTA ORDEM UTILIZANDO FCM	81
FIGURA 51 – OSCILAÇÃO SUSTENTADA PARA O SISTEMA DE QUINTA ORDEM COM ZERO	82
FIGURA 52 – COMPARAÇÃO DAS RESPOSTAS DOS AJUSTES PARA O SISTEMA DE QUINTA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO <i>FUZZY</i> .	83
FIGURA 53 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES NA CAMPANHA PARA O SISTEMA DE QUINTA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	84
FIGURA 54 – COMPARAÇÃO DAS RESPOSTAS DOS AJUSTES PARA O SISTEMA DE QUINTA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO FCM	85
FIGURA 55 – COMPARAÇÃO DOS AJUSTES NA CAMPANHA PARA O SISTEMA DE QUINTA ORDEM (COM ZERO) UTILIZANDO FCM.....	86
FIGURA 56 – OSCILAÇÃO SUSTENTADA PARA O FERMENTADOR ALCOÓLICO	87
FIGURA 57 – COMPARAÇÃO DA RESPOSTA POR <i>FUZZY</i> COM OUTROS MÉTODOS APLICADOS AO FERMENTADOR	88
FIGURA 58 – COMPARAÇÃO DA CAMPANHA DE PRODUÇÃO UTILIZANDO <i>FUZZY</i>	89
FIGURA 59 – RESPOSTAS NO INÍCIO DA CAMPANHA DE PRODUÇÃO (<i>FUZZY</i>)	90
FIGURA 60 – COMPARAÇÃO DA RESPOSTA POR FCM COM OUTROS MÉTODOS APLICADOS AO FERMENTADOR	91
FIGURA 61 – COMPARAÇÃO DA CAMPANHA DE PRODUÇÃO UTILIZANDO FCM	92
FIGURA 62 – RESPOSTAS NO INÍCIO DA CAMPANHA DE PRODUÇÃO (FCM) ..	93
FIGURA 63 – COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM.....	94
FIGURA 64 – COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM COM ZERO	95
FIGURA 65 – COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE QUARTA ORDEM.....	95
FIGURA 66 – COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE QUARTA ORDEM COM ZERO...	96
FIGURA 67 – COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE QUINTA ORDEM	97
FIGURA 68 – COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE QUINTA ORDEM COM ZERO	98

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EQUAÇÕES DE AJUSTE POR ZIEGLER-NICHOLS.....	30
TABELA 2 – EQUAÇÕES DE AJUSTE POR TYREUS-LUYBEN.....	31
TABELA 3 – REGRAS DO SISTEMA FUZZY.....	53
TABELA 4 – REGRAS DO SISTEMA FUZZY.....	53
TABELA 5 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM (FUZZY).....	58
TABELA 6 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM (FCM).....	60
TABELA 7 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM COM ZERO (FUZZY).....	63
TABELA 8 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TERCEIRA ORDEM COM ZERO (FCM).....	65
TABELA 9 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE QUARTA ORDEM (FUZZY).....	68
TABELA 10 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE QUARTA ORDEM (FCM).....	71
TABELA 11 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE QUARTA ORDEM COM ZERO (FUZZY).....	74
TABELA 12 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE QUARTA ORDEM COM ZERO (FCM).....	76
TABELA 13 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE QUINTA ORDEM (FUZZY).....	78
TABELA 14 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE QUINTA ORDEM (FCM).....	80
TABELA 15 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE QUINTA ORDEM COM ZERO (FUZZY).....	83
TABELA 16 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE QUINTA ORDEM COM ZERO (FCM).....	86
TABELA 17 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA (FUZZY).....	89
TABELA 18 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA (FCM).....	91
TABELA 19 - RESUMO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS.....	99

LISTA DE SIGLAS

CLP	Controlador Lógico Programável.
DAELT	Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Departamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
FCM	Termo em inglês para Mapas Cognitivos <i>Fuzzy</i> .
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i> – ferramenta computacional
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional, Integral Derivativo
Simulink	<i>Simulation and Link</i> – ferramenta do <i>software</i> MatLab

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PROBLEMAS E PREMISSAS	16
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	OBJETIVOS	19
1.3.1	Objetivo Geral	19
1.3.2	Objetivos Específicos	19
1.4	MÉTODO DE PESQUISA	20
2	CONTROLADORES INDUSTRIAIS E TÉCNICAS DE SINTONIA.....	23
2.1	CONTROLADOR PID	23
2.2	QUALIDADE DO CONTROLE	25
2.3	A ANÁLISE PELO LUGAR DAS RAÍZES	27
2.4	MÉTODO DA OSCILAÇÃO CRÍTICA	30
3	CONTROLE ADAPTATIVO E SISTEMAS INTELIGENTES.....	32
3.1	CONTROLE ADAPTATIVO	32
3.2	SISTEMAS INTELIGENTES.....	33
3.2.1	Sistema Fuzzy	34
3.2.2	Mapas Cognitivos Fuzzy	36
3.3	AJUSTE AUTOMÁTICO POR SISTEMAS INTELIGENTES	38
4	VALIDAÇÃO DA PROPOSTA	39
4.1	SISTEMAS DINÂMICOS	39
4.2	PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA	44
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	47
5.1	SISTEMA FUZZY	49
5.2	MAPAS COGNITIVOS FUZZY	54
5.3	RESULTADOS DOS SISTEMAS SIMULADOS	56
5.3.1	Sistema dinâmico de terceira ordem	56
5.3.1.1	Sistema Fuzzy	56
5.3.1.2	Mapas Cognitivos Fuzzy	59
5.3.2	Sistema dinâmico de terceira ordem com zero	62
5.3.2.1	Sistema Fuzzy	62
5.3.2.2	Mapas Cognitivos Fuzzy	65
5.3.3	Sistema dinâmico de quarta ordem	67
5.3.3.2	Mapas Cognitivos Fuzzy	70
5.3.4	Sistema dinâmico de quarta ordem com zero	72
5.3.4.1	Sistema Fuzzy	72
5.3.4.2	Mapas Cognitivos Fuzzy	75
5.3.5	Sistema dinâmico de quinta ordem	77
5.3.5.1	Sistema Fuzzy	77
5.3.5.2	Mapas Cognitivos Fuzzy	79
5.3.6	Sistema dinâmico de quinta ordem com zero.....	81
5.3.6.1	Sistema Fuzzy	81
5.3.6.2	Mapas Cognitivos Fuzzy	85
5.3.7	Processo de fermentação alcoólica.....	87
5.3.7.1	Sistema Fuzzy	87
5.3.7.2	Mapas Cognitivos Fuzzy	90
5.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	93
6	CONCLUSÃO.....	101
	REFERÊNCIAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

Devido à sua estrutura simples, robusta e que alia performance a um baixo custo, o controlador Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID) é amplamente utilizado pela indústria atualmente (OGATA, 2003). Entretanto, o emprego desta técnica depende de ajustes de parâmetros para seu correto funcionamento, de acordo com o sistema em que se está sendo aplicado. Este processo depende de uma metodologia para ser realizado e nem sempre o procedimento é um trabalho simples e que resulta em respostas satisfatórias (CHUN-YUAN et al., 2011).

A auto sintonia, também conhecida como ajuste adaptativo, é um dos métodos que mais tem avançado com o desenvolvimento das ferramentas de sistemas inteligentes. De acordo com Aström e Hägglund (2006), o processo de sintonia automática consiste na geração de uma perturbação (degrau unitário, rampa, sinal senoidal, etc.), na avaliação da resposta à perturbação e o posterior cálculo automático dos parâmetros do controlador.

Na literatura encontram-se referências de diversos dispositivos que podem ser utilizados para as mais variadas aplicações no intuito de tornar processos independentes de intervenção humana em sua operação. Franchi (2011) cita alguns equipamentos como o Controlador Lógico Programável (CLP) e os Sistemas de Controle Distribuídos. Para que estas ferramentas possam obter funcionamento adequado, diversas técnicas de controle foram desenvolvidas para serem aplicadas.

Este trabalho utiliza os controladores PID como ferramenta de controle. Para o funcionamento deste dispositivo, existem parâmetros que devem ser ajustados e os ajustes *offline* comumente tratados pela literatura são os realizados por técnicas propostas por Ziegler e Nichols (1942).

Diversas outras técnicas de ajustes estão presentes na literatura, porém a grande maioria dos ajustes é feita em campo e esta é vantajosa pois normalmente não se necessita do conhecimento intrínseco do modelo matemático da planta (OGATA, 2003). Entretanto, este meio não dispõe dos melhores resultados. A implementação destes controladores depende de uma série de fatores que muitas vezes dificultam sua aplicação em processos que necessitam ser controlados.

No entanto, utilizando-se do conhecimento heurístico de especialistas em ajustes por observação é possível aplicar as ferramentas de Sistemas Inteligentes – como *Fuzzy* e Mapas Cognitivos *Fuzzy* (do inglês *Fuzzy Cognitive Maps - FCM*) – para transpor esses conhecimentos para um dispositivo que é capaz de realizar a mesma operação, não estando sujeita a variações de interpretação ao longo do tempo.

Diversos trabalhos envolvendo o ajuste automático de controladores PID e controle inteligente podem ser encontrados na literatura. Coelho (2004), por exemplo, desenvolveu uma contribuição onde os parâmetros do controlador são ajustados pelo método da linearização harmônica, utilizando um relé com histerese. Junior (1999) também apresentou resultados para um ajuste utilizando relés na realimentação para um sistema de processos térmicos de primeira ordem com tempo morto.

Yesil et al. (2011) propõem em seu trabalho um ajuste para um controlador Proporcional Integrativo (PI) utilizando Mapas Cognitivos *Fuzzy* com ajustes *online* ativados quando o valor de referência em malha fechada apresenta mudança. Em seu trabalho, Almeida e Coelho (2001) desenvolvem controladores PID utilizando três estratégias, sendo elas: auto ajuste por método de relés e nebuloso; e uma proposta de PID nebuloso utilizando regras nebulosas para o escalonamento dos ganhos.

Matas (2012) apresenta um algoritmo de controle adaptativo por modelo de referência utilizado para realizar o auto ajuste dos parâmetros de um controlador PID aplicado ao controle de velocidade angular de um motor de corrente contínua. Gosmann (2002) realiza um estudo sobre o controle de sistemas multivariáveis não-lineares. Para tal trabalho, o autor utilizou a análise de um controlador PID aplicado a um sistema de tanques acoplados, amplamente utilizados na indústria.

O enfoque deste trabalho está na comparação entre os resultados adquiridos nas simulações de um controlador PID ajustado automaticamente por *Fuzzy* e FCM, para validar o algoritmo proposto. Sistemas dinâmicos genéricos de diferentes ordens e um processo de fermentação alcoólica multivariável com resposta não linear são utilizados nas simulações. O desenvolvimento baseia-se na aquisição de parâmetros iniciais pelo método da oscilação crítica, utilizando a tabela de sintonia propostas por Tyreus-Luyben e ajustá-los automaticamente utilizando Sistemas Inteligentes em iterações *off-line*. De maneira a comparar a efetividade do ajuste, os resultados também são confrontados com o ajuste por Ziegler-Nichols.

Em especial para o caso deste trabalho, a utilização de sistemas baseados em *Fuzzy* mostra-se como um grande diferencial, pois esta utiliza-se do conhecimento heurístico de um especialista sobre a planta/sistema para seu desenvolvimento. Para efeito de desenvolvimento, objetiva-se propor um controlador ajustado por Mapas Cognitivos *Fuzzy* e por Sistema *Fuzzy*, comparando seus resultados e destacando as viabilidades e inviabilidades de cada.

Esta monografia está dividida em seis capítulos, incluindo a presente introdução, contendo os problemas, justificativas e objetivos do trabalho. O segundo capítulo trata dos controladores industriais, em especial o controlador Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID), destacando os métodos de análise e ajuste utilizados. O terceiro capítulo apresenta os conceitos de controle adaptativo, sistemas inteligentes e como a união de ambos pode ser utilizada para o ajuste automático dos parâmetros de sistemas de controle. O quarto capítulo aborda quais são os sistemas utilizados para simular a eficácia do ajuste automático, sendo estes sistemas dinâmicos genéricos e um modelo de um fermentador alcoólico. O quinto capítulo reúne os resultados alcançados pela aplicação dos sistemas inteligentes no ajuste automático dos parâmetros do controlador PID e a comparação da resposta de ambos os sistemas propostos. O sexto capítulo expõe as conclusões acerca do trabalho baseadas nos resultados encontrados através das simulações. Por fim, encerra-se este trabalho apresentando quais as referências consultadas para seu desenvolvimento.

1.1 PROBLEMAS E PREMISSAS

As aplicações de controladores PID são amplas e podem contemplar sistemas hidráulicos, pneumáticos e outros. De acordo com Ogata (2003), a grande parte dos controladores nas indústrias são ajustados em campo, com a observação da resposta do sistema. Quando os ajustes são realizados por operadores, os resultados estão sujeitos à negligência sobre determinados cenários, à não identificação de fatores externos que podem influenciar no controle a longo prazo e à imprecisão nas ações que podem tornar o *setup* ineficaz.

Mesmo que o operador possua conhecimento aprofundado sobre o funcionamento da planta a ser controlada, o ajuste por observação pode não prover resposta eficiente caso a planta possua características que alteram sua dinâmica ao longo do tempo. Segundo Figueiredo e Jota (2004) *apud* Ferreira (2009), alguns processos podem apresentar certas peculiaridades, tais como não-linearidades, atrasos de transporte e/ou parâmetros variantes no tempo, que tornam o controle PID clássico ineficiente, resultando em uma resposta insatisfatória.

Portanto, ajustes mal executados podem comprometer equipamentos, causar perda de produção por ineficiência e gerar altos custos de *startup*, para casos onde o reajuste dos parâmetros se tornam constantes.

Em relação ao caso específico deste trabalho, os sistemas utilizados nas simulações possuem características diferentes. Inicialmente, são utilizados sistemas dinâmicos lineares genéricos de diferentes ordens para a comparação. *A priori*, quanto maior o grau do sistema, mais difícil se torna a obtenção dos parâmetros do controlador. Já o processo de fermentação alcoólica é não-linear e possui comportamento de fase não mínima, apresentando grande tempo de acomodação. Essas características tornam o controle de difícil realização e ajuste.

1.2 JUSTIFICATIVA

Sistemas controlados de maneira eficiente e satisfatória possuem impacto significativo na competitividade das organizações. Processos bem controlados resultam em produtos de melhor qualidade e redução de custos responsáveis por aumentar a participação de mercado das empresas.

Em pesquisas realizadas nos Estados Unidos, Yu (2006) apresenta algumas estatísticas envolvendo o desempenho das malhas de controle em alguns setores da indústria:

- Na indústria de papel e celulose, somente 20% de suas malhas de controle operam de maneira satisfatória;

- Nas indústrias de processos em geral, 23% dos controladores são automáticos e 17% utilizam ajustes padrão vindos de fábrica sem a avaliação da planta a ser aplicada.
- De forma geral, apenas 32% das malhas de controle possuem classificação como aceitável.

Como apresentado, apenas uma pequena parcela das malhas de controle opera de maneira satisfatória, o que ocasiona grande ineficiência nos processos industriais. Logo, a necessidade da instalação de controladores eficientes é de grande importância na realidade das indústrias.

Controladores bem ajustados evitam perdas no processo e melhoram os resultados das empresas. Além disso, garantem os três objetivos principais dos controles de processos: redução da variabilidade, aumento da eficiência e segurança (FRANCHI, 2011).

- Redução da variabilidade: quanto menor for a variabilidade do produto final, melhor será sua qualidade. Os sistemas de controle se comportam de maneira aproximar a composição dos produtos de acordo com o necessário. Diminuindo a variabilidade é possível reduzir também os custos. O autor cita o exemplo de uma destilaria, onde o processo de produção de etanol anidro envolve uma mistura de álcool, água e outros componentes. Se os controladores não atuarem de maneira correta, o percentual de álcool pode ser maior do que o necessário (gerando perdas financeiras para a indústria) ou então menor do que o preciso (gerando problemas com órgãos reguladores de distribuição de combustíveis);
- Aumento da eficiência: muitos processos industriais precisam estar em um determinado ponto de operação para que o produto final possua boa qualidade. O não cumprimento dessa condição pode demandar a aplicação de mais recursos consumindo tempo e finanças. Como exemplo, citam-se os sistemas de pasteurização de leite, que precisam aquecê-lo a uma determinada temperatura e permanecer nesta por pouco tempo. Um controle mal efetuado pode causar comprometimento na qualidade do leite ou até mesmo a sua inutilização;

- **Segurança:** o controle de caldeiras e usinas nucleares, por exemplo, podem oferecer grandes riscos se controlados de maneira indevida. Dispositivos mal projetados podem levar a acidentes com consequências de ordem catastrófica.

Desta maneira, sistemas com ajustes bem aplicados geram produtos de alto padrão de qualidade, garantem que seus processos estejam operando com eficiência otimizada e com segurança para as pessoas envolvidas na produção e os ativos da empresa.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar os resultados de sintonia do controlador PID com parâmetros ajustados automaticamente por *Fuzzy* e FCM aplicados a sistemas dinâmicos genéricos de diferentes ordens e a um processo de fermentação alcoólica, para comprovar o aumento de eficiência gerado pelo algoritmo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos irão tratar os requisitos a serem alcançados para se atingir o objetivo geral. Para este trabalho, seguem:

- Compreender o funcionamento dos controladores PID e de controle adaptativo;
- Estudar os conceitos e aplicações das ferramentas inteligentes (*Fuzzy* e FCM);
- Desenvolver um algoritmo utilizando lógica *Fuzzy* para ajuste automático dos parâmetros;

- Validar o algoritmo através da simulação utilizando *Fuzzy* em sistemas dinâmicos de terceira, quarta e quinta ordens e em um processo de fermentação alcoólica;
- Projetar um sistema utilizando FCM para ajuste dos parâmetros;
- Realizar a simulação do algoritmo utilizando FCM nos mesmos sistemas utilizados para o *Fuzzy*;
- Analisar e comparar os resultados apresentados por ambas simulações;

1.4 MÉTODO DE PESQUISA

De maneira a atingir todos os objetivos pré-estabelecidos, uma série de etapas devem ser cumpridas. A ordem lógica está descrita abaixo:

- Etapa 1: Pesquisa bibliográfica. A fim de adquirir os conhecimentos necessários para o início do desenvolvimento do trabalho, o levantamento bibliográfico acerca dos conceitos teóricos é imprescindível. Dentre os itens pesquisados, estão os controladores PID, o Sistema *Fuzzy* e os Mapas Cognitivos *Fuzzy*, as técnicas de controle moderno e as técnicas de controle adaptativo, de sistemas dinâmicos genéricos e do fermentador alcoólico. Este levantamento inclui a reunião de livros, artigos, dissertações e teses pertinentes ao tema tratado, disponíveis na Biblioteca da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio, no portal IEEE na web e anais de diversos congressos nacionais e internacionais. Todo o material relacionado servirá como referência assim como consulta para a compreensão das técnicas e ferramentas abordadas;
- Etapa 2: Criação da rotina para aquisição dos parâmetros iniciais do controlador PID. Essa rotina implementa um algoritmo que incrementa o ganho proporcional até que se identifique uma resposta com oscilação sustentada. A partir dessa condição, aplicar o ganho crítico e

o período crítico na tabela de Tyreus-Luyben para aquisição do ajuste inicial;

- Etapa 3: Objetiva-se então o desenvolvimento de um conjunto *Fuzzy* capaz de ajustar os parâmetros do controlador PID de maneira automática de acordo com a rotina de ajuste. Para tal, necessita-se determinar quais as entradas e saídas do sistema *Fuzzy* a serem utilizadas para dar início ao projeto. As regras de inferência devem ser obtidas de acordo com o conhecimento sobre a ação dos parâmetros individualmente e em conjunto, e estas serão utilizadas para a tomada de decisão. Após obter o sistema desenvolvido, utilizar-se-á o software para simulação e validação do sistema, realizando ajustes quando necessário até que se atinja o objetivo. Os resultados serão avaliados de acordo com o erro IAE (do inglês *Integral Absolute Error*) acumulado ao longo da campanha, o tempo de subida, o máximo *overshoot* (sobressinal) e o tempo de acomodação;
- Etapa 4: Após a aquisição dos resultados do controlador ajustado por *Fuzzy*, aplica-se os parâmetros encontrados, e também os parâmetros obtidos pelas tabelas de Ziegler-Nichols e Tyreus-Luyben, em uma campanha de simulação que utiliza uma onda quadrada como perturbação de entrada. Desta forma é possível observar se o conjunto de parâmetros determinados levam a resultados satisfatórios;
- Etapa 5: Como modo de avaliação dos métodos, dimensionar-se-á um controlador que utilize também um FCM para auto ajuste dos parâmetros do controlador. Desta maneira, pode-se comparar os resultados e medir a eficácia dos dois métodos aplicados ao controle adaptativo. O desenvolvimento do FCM segue os mesmos procedimentos do *Fuzzy*, de acordo com as etapas 3 e 4. Da mesma forma, será aplicado o sistema para controlar os parâmetros do PID de maneira automática na planta através do *software* Matlab® e os resultados serão avaliados de maneira coerente ao método anterior;
- Etapa 6: Com os resultados obtidos, serão analisados os valores do erro acumulativo, do máximo sobressinal, do tempo de subida e do tempo de acomodação para determinar se são capazes de mostrar a capacidade de auto ajuste do controlador. Observando-se a resposta

apresentada pelo processo, é possível avaliar a eficiência dos controles utilizando a capacidade adaptativa.

Através da metodologia apresentada acima, concluiu-se o trabalho baseando nos resultados obtidos e avaliando a eficácia de ambos os sistemas inteligentes quando aplicados ao auto ajuste de parâmetros de controladores PID.

2 CONTROLADORES INDUSTRIAIS E TÉCNICAS DE SINTONIA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica acerca dos controladores PID, os parâmetros analisados para avaliar a resposta do sistema, o método de análise de comportamento de sistemas dinâmicos e do método utilizado para ajuste de parâmetros do controlador.

2.1 CONTROLADOR PID

Os controladores PID têm por tarefa principal manter a saída de um sistema em um valor desejado. O processo envolve a avaliação da diferença entre o sinal advindo da planta controlada e o valor de *setpoint* (erro) e o tratamento deste valor através de três parâmetros ajustáveis. Segundo Goodwin, Graebe e Salgado (2000), apesar de o impacto dos parâmetros em malha fechada seja diferente daquele observado individualmente, estes podem ser caracterizados como seguem:

- Proporcional: a atuação do controlador cresce proporcionalmente ao erro calculado. O controlador proporcional é capaz de controlar qualquer planta estável, porém possui desempenho limitado e não garante que o erro estacionário seja anulado;
- Integrativo: a saída é proporcional ao erro acumulado, sendo utilizado para anular o erro estacionário;
- Derivativo: é proporcional a variação do erro. Utilizado para amortecer oscilações.

O modelo matemático do controlador é dado pela equação:

$$MV(t) = K_p E(t) + K_i \int E(t) dt + K_d \frac{dE(t)}{dt} \quad (1)$$

onde:

- $MV(t)$: variável manipulada no tempo;
- K_p, K_i, K_d : ganhos ajustáveis para as componentes P, I e D;
- $E(t)$: valor do erro calculado no tempo.

Aplicando a transformada de Laplace na equação (1), temos a função de transferência $F(s)$ para o domínio da frequência:

$$F(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

A equação (2) caracteriza o modelo matemático do controlador PID baseado no ganho proporcional K_p , no tempo integrativo T_i e no tempo derivativo T_d , onde:

$$K_d = K_p \cdot T_d \quad (3)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (4)$$

A Figura 1 mostra o diagrama de blocos que caracteriza o controlador, juntamente com as expressões matemáticas.

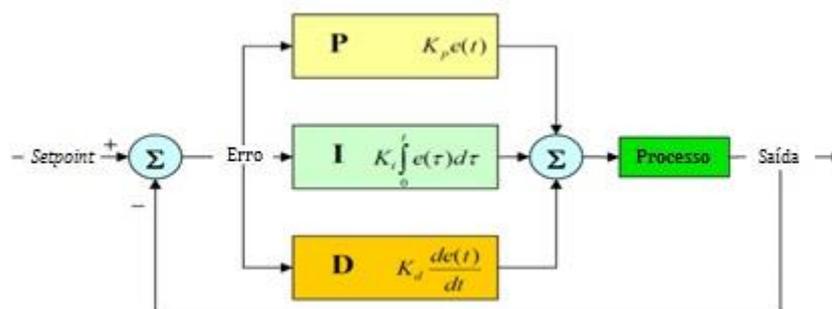


Figura 1 – Diagrama representativo do controlador PID
Fonte: Adaptado de Franchi (2011).

A aquisição dos parâmetros para o controlador – de acordo com a planta a ser controlada – é conhecido como sintonia ou ajuste. Segundo Ogata (2003), se um modelo matemático da planta é conhecido, existem diversos métodos analíticos de

sintonia dos parâmetros do controlador que podem ser definidos de acordo com a exigência do projeto a ser implantado. Dessas técnicas, o método de Ziegler-Nichols é o mais retratado pela literatura.

Porém, quando planta possui alto grau de complexidade matemática e um modelo não pode ser adquirido, os parâmetros são geralmente ajustados de maneira heurística ou empírica de acordo com o conhecimento do especialista em automação até que se observe uma boa resposta a perturbações ao longo de uma campanha de produção (FRANCHI, 2011). A avaliação da performance do sistema se dá de acordo com a análise feita pelo especialista sobre a estabilidade da resposta e os itens de qualidade de controle, que serão evidenciadas na seção 2.2.

Ainda, se tratando de sistemas em que não há conhecimento sobre o modelo da planta, Ziegler e Nichols (1947) desenvolveram uma proposta contendo dois métodos de ajuste que envolvem a determinação do ganho K_p , do tempo integral T_i e do tempo derivativo T_d . Este trabalho utiliza o segundo método de ajuste de Ziegler e Nichols, chamado de método da oscilação crítica, que será demonstrado na seção 2.4.

2.2 QUALIDADE DO CONTROLE

De maneira a avaliar o desempenho de controladores, existem índices presentes nas malhas de controle que podem ser analisados. Estes índices são estabelecidos em função da resposta em regime transiente a um degrau unitário (FRANCHI, 2011).

Os parâmetros mencionados possuem especificações e, alguns destes, limites para um controle estável, como descrito abaixo:

- Sobressinal (*overshoot*) máximo (OV_{max}): é caracterizado como o valor de pico da resposta, que excede o valor de *setpoint* especificado. Pode ser definido pela equação (5) (FRANCHI, 2011):

$$OV_{max} = 100 \cdot \frac{B}{A} \% \quad (5)$$

- Tempo de subida, t_r (rise time): de acordo com Ogata (2003), o tempo de subida é o período registrado pela resposta do sistema compreendido entre 0% e 100% - ou 10% e 90% - do valor de *setpoint*;
- Instante de pico, t_p (peak time): tempo registrado quando ocorre o pico global de sobressinal;
- Tempo de acomodação, t_s (settling time): tempo necessário para a resposta alcançar e permanecer dentro de uma faixa de valores em torno de 2% a 5% do *setpoint*;
- Tempo de atraso, t_d (delay time): tempo requerido para a resposta alcançar a metade do valor de *setpoint*.

A Figura 2 demonstra a resposta típica de um sistema de segunda ordem com os índices relacionados acima.

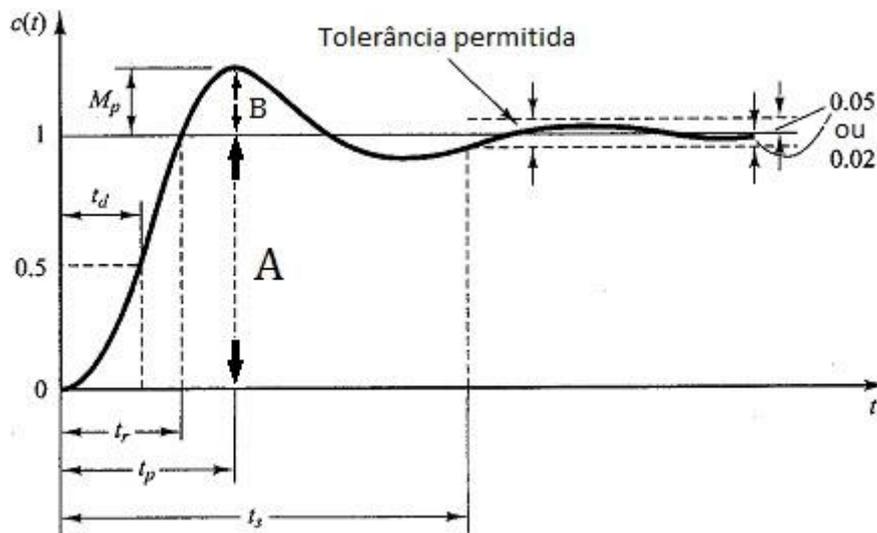


Figura 2 – Resposta típica de um sistema submetido a uma entrada degrau unitário
 Fonte: Adaptado de Ogata (2003).

Dentre os índices apresentados acima, este trabalho utiliza o máximo sobressinal, o tempo de subida e o tempo de acomodação para avaliação da resposta dos sistemas utilizados nas simulações.

Outro índice utilizado neste trabalho como parâmetro para medir a qualidade do controle é conhecido como IAE (integral da magnitude absoluta do erro). Este

índice demonstra o valor do erro absoluto acumulado ao longo da campanha e pode ser utilizado como referência para medir a aproximação do valor requerido.

$$IAE = \int_0^{\infty} |E(t)| dt \quad (6)$$

Uma vez que as simulações são executadas e baseadas em amostras discretas, o erro IAE é calculado de acordo com a equação (7).

$$IAE = IAE + erro_{atual} \quad (7)$$

Onde:

$$erro_{atual} = |setpoint - MV(t)| \quad (8)$$

2.3 A ANÁLISE PELO LUGAR DAS RAÍZES

A análise por lugar das raízes possibilita uma avaliação sobre a estabilidade e desempenho de um sistema em malha fechada. A localização de seus polos indica o comportamento da resposta do sistema.

Para sistemas em malha fechada, é possível observar como os polos se movem no plano s através da variação do ganho proporcional K (OGATA, 2003).

$$G(s) = K \cdot \frac{(s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_n)} \quad (9)$$

Onde:

K = Ganho do sistema em malha fechada

$z_1, z_2 \dots z_m$ = Zeros do sistema

$p_1, p_2 \dots p_n$ = Polos do sistema

Com o aumento do ganho K da equação (9), os polos do sistema se movem no plano s em direção aos zeros e/ou em direção ao ∞ . Como exemplo, considera-se o sistema representado pela equação (10):

$$G(s) = K \cdot \frac{(1 - s)}{2,89s^3 + 5,79s^2 + 3,9s + 1} \quad (10)$$

No sistema apresentado temos um zero no semiplano direito ($z_1 = 1$), polos conjugados complexos $p_{1,2} = -0,5 \pm 0,3i$ e um polo real em $p_3 = -1$, conforme observado na Figura 3.

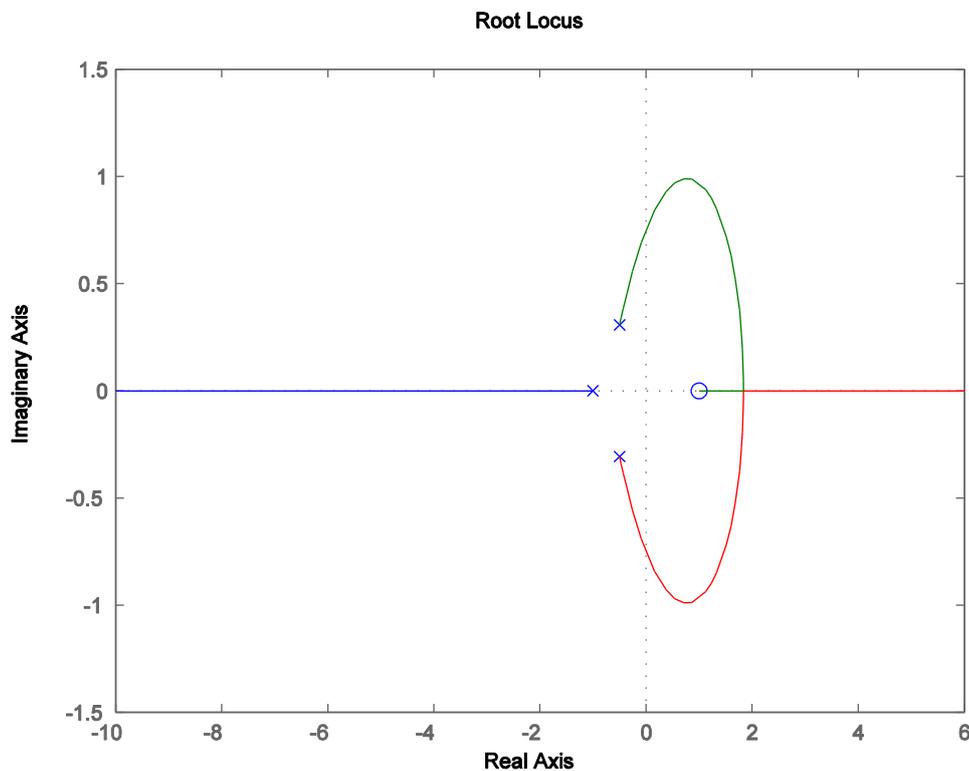


Figura 3 – Diagrama de lugar das raízes do sistema da equação (10)
Fonte: autoria própria.

Com o aumento do valor do ganho K , o polo real desloca-se em direção ao $-\infty$ no eixo real e os polos $p_{1,2}$ se movem em direção ao semi-plano direito, buscando o zero do sistema e $+\infty$. Observa-se, ao passo que o ganho proporcional é aumentado, o sistema passa sofrer maiores oscilações. Quando o polo complexo sobrepõe o eixo $j\omega$, o sistema entra em oscilação sustentada, estado em que a resposta está no limite

entre a estabilidade e a instabilidade. Neste exemplo, a oscilação sustentada é alcançada com ganho crítico $K_{cr} = 2,2$. A Figura 4 apresenta o comportamento da resposta do sistema de acordo com o aumento do ganho proporcional K_p .

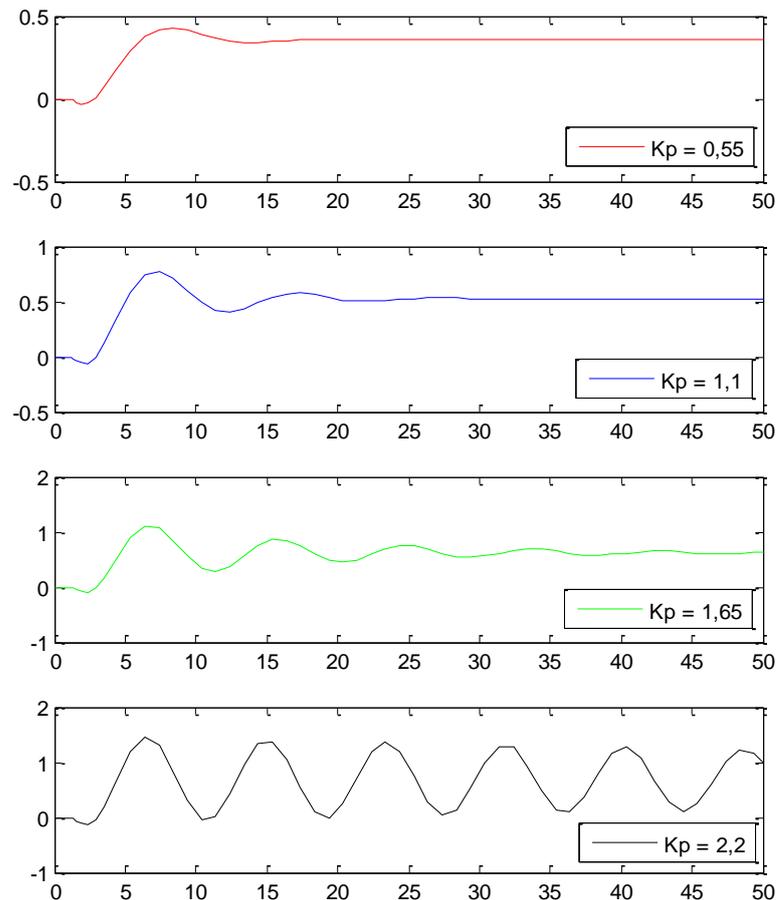


Figura 4 – Resposta do sistema de acordo com o aumento do ganho proporcional
Fonte: autoria própria.

A análise do lugar dos polos, e como estes se comportam com a variação do ganho é importante para determinar se o segundo método de Ziegler-Nichols é aplicável para o sistema ao qual se deseja controlar. Caso nenhum dos polos conjugados cruzem o eixo $j\omega$, a resposta do sistema nunca alcançará oscilação crítica, impossibilitando a utilização deste método.

2.4 MÉTODO DA OSCILAÇÃO CRÍTICA

O segundo método de Ziegler-Nichols, conhecido também como o método do ganho crítico, é utilizado em malha fechada e determina os parâmetros do controlador PID através do ganho crítico e do período crítico do sistema.

O ganho crítico é o valor do ganho proporcional (K_{cr}) necessário para levar a resposta em malha fechada à oscilação sustentada, ou seja, com período e amplitude constantes. Já o período crítico (P_{cr}) é caracterizado pelo período da oscilação quando o sistema está marginalmente estável.

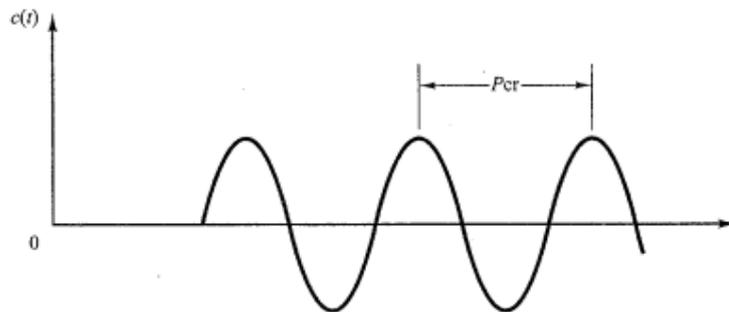


Figura 5 – Sistema em oscilação sustentada
Fonte: Adaptado de Ogata (2003).

Conforme citado por Ogata (2003), quando o modelo matemático do processo é conhecido é possível determinar o valor de K_{cr} e a frequência das oscilações ω_{cr} ($2\pi/\omega_{cr} = P_{cr}$) pelo método do lugar das raízes.

Para casos em que o modelo matemático não pode ser adquirido, o procedimento consiste em estabelecer valor nulo para os ganhos derivativo e integrativo, aplicar uma perturbação do tipo degrau e incrementar o ganho proporcional até a variável do processo começar a oscilar com amplitude constante.

Tabela 1 – Equações de ajuste por Ziegler-Nichols

Tipo do Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$1/1,2 P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: Franchi (2011).

Após a identificação do ganho e período críticos, os parâmetros do controlador PID podem ser obtidos através da Tabela 1, proposta por Ziegler e Nichols.

O método de Ziegler-Nichols é amplamente utilizado em processos industriais por sua confiabilidade. Porém, esta técnica garante um taxa de decaimento de $\frac{1}{4}$, o que gera uma resposta oscilatória com grande *overshoot* quando o sistema é submetido a variações de *setpoint*. Devido a estes fatores, especialistas recomendam a obtenção dos parâmetros do controlador PID utilizando o ajuste proposto por Tyreus e Luyben (FRANCHI, 2011), mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Equações de ajuste por Tyreus-Luyben

Tipo do Controlador	K_p	T_i	T_d
PI	$0,31K_{cr}$	$2,21P_{cr}$	0
PID	$0,45K_{cr}$	$2,2P_{cr}$	$0,158P_{cr}$

Fonte: Franchi (2011).

Os ajustes de Tyreus-Luyben apresentam uma resposta com baixo (ou nulo) *overshoot*, porém a desvantagem está no alto tempo de acomodação, muitas vezes apresentando erro estacionário.

3 CONTROLE ADAPTATIVO E SISTEMAS INTELIGENTES

Os temas relacionados ao ajuste automático de controladores industriais e a utilização de sistemas inteligentes têm ganhado maior destaque em publicações científicas e trabalhos de diplomação. A união da ferramenta ao método tem apresentado bons resultados.

3.1 CONTROLE ADAPTATIVO

Um sistema de controle adaptativo possui como característica a capacidade dos controladores em se adaptarem às propriedades da planta através de ajustes automáticos de seus parâmetros para alteração da malha em função do erro (Ferreira, 2009).

O principal objetivo dessa estratégia é monitorar e avaliar o *feedback* do processo controlado e alterar alguns aspectos do mecanismo de controle para fornecer melhor eficiência e desempenho para a planta.

As principais funções do controle adaptativo são:

- Identificação: análise do erro, e dos fatores de medição de qualidade da resposta, para obtenção do desempenho atual do sistema;
- Decisão: a partir da identificação, o controlador decide por qual parâmetro alterar para obter um desempenho mais apurado;
- Modificação: aplicação da alteração determinada pela etapa de decisão.

O controle clássico utiliza da estabilidade relativa para avaliar e gerar um fator de controle que possa ser utilizado mesmo perante as incertezas ao longo da campanha. Porém, algumas plantas controladas sofrem grandes influências de componentes internos ou externos apresentando variações tão significativas que uma malha de controle com ganho linear não é capaz de atender satisfatoriamente. Logo,

é necessário que haja um controle que se adapta a essas mudanças e garanta a estabilidade do sistema. (Berto, Sá e Jr., 2004).

Segundo Ferreira (2009), um sistema de controle adaptativo possui duas malhas de controle a serem consideradas: a malha convencional com realimentação linear; e a malha de adaptação, responsável por analisar, decidir e aplicar alterações no controlador.

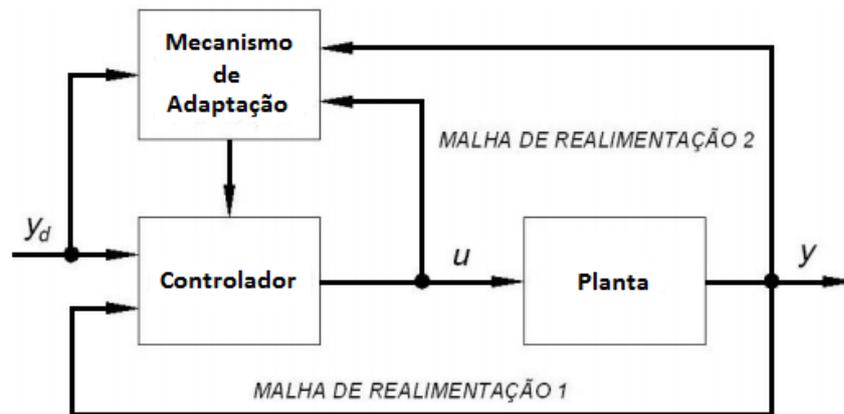


Figura 6 – Mecanismo de adaptação
Fonte: Adaptado de Ferreira (2009).

A Figura 6 ilustra o mecanismo de avaliação e adaptação do controlador. O módulo de adaptação recebe os valores advindos da ação do controlador e da resposta da planta e ajusta os valores do controlador.

3.2 SISTEMAS INTELIGENTES

Os Sistemas Inteligentes são ferramentas que utilizam uma base de conhecimento advinda da percepção humana. Estas ferramentas são baseadas no funcionamento dos sistemas biológicos, como as redes neurais artificiais; e em informações imprecisas, como os sistemas baseados em *Fuzzy* (ZADEH, 1968).

Neste trabalho são utilizados dois métodos baseados em conceitos *Fuzzy*: a lógica nebulosa (ou Sistema *Fuzzy*) e os Mapas Cognitivos *Fuzzy*.

3.2.1 Sistema Fuzzy

A lógica difusa, ou lógica *Fuzzy*, proposta por Zadeh (1968), são sistemas projetados para utilizar os conhecimentos de seres humanos através de conceitos linguísticos para sua operação. Esta é uma importante ferramenta computacional, pois é capaz de lidar com informações imprecisas, advindas do conceito humano, que geralmente não apresentam alto grau de precisão sobre os diversos fenômenos físicos existentes (ROSS, 2004).

A lógica *Fuzzy*, diferenciando-se da lógica convencional, permite que suas variáveis possuam graus de pertinência. Enquanto a lógica convencional está atrelada à lógica booleana (verdadeiro ou falso), o *Fuzzy* admite transitórios entre seus níveis lógicos, como mostra a Figura 7.

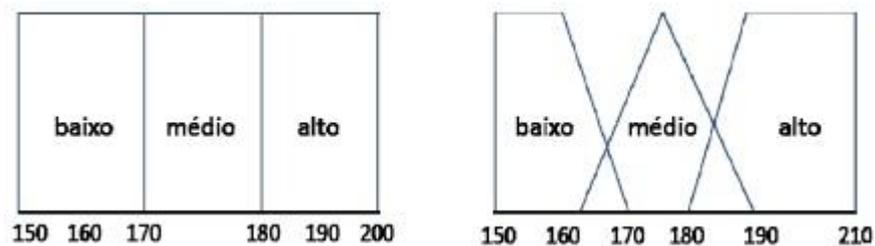


Figura 7 – Representação utilizando conceitos arbitrários para a Lógica Clássica (à esquerda) e para o Sistema *Fuzzy* (à direita)

Fonte: Marro et al. (2011).

A possibilidade de aplicação desta ferramenta é de extrema importância pois aproveita-se do conhecimento heurístico de um operador sobre um determinado sistema e pode ser implementada sem que haja especificamente o conhecimento sobre o modelo matemático da planta.

Estes sistemas, quando bem empregados, podem trazer grandes melhorias e soluções para diversas aplicações, como no controle de processos industriais (PASSINO; YOURKOVICH, 1997). Dentro destas aplicações industriais, o sistema *Fuzzy* permite que os dados sejam tratados na forma de variáveis linguísticas, sendo relacionadas internamente através de regras.

O método mais utilizado atualmente, que envolve conceitos de fuzzificação, defuzzificação e máquina de inferência, foi proposto por King e Mamdani (1977). A Figura 8 mostra a estrutura do controlador proposto.

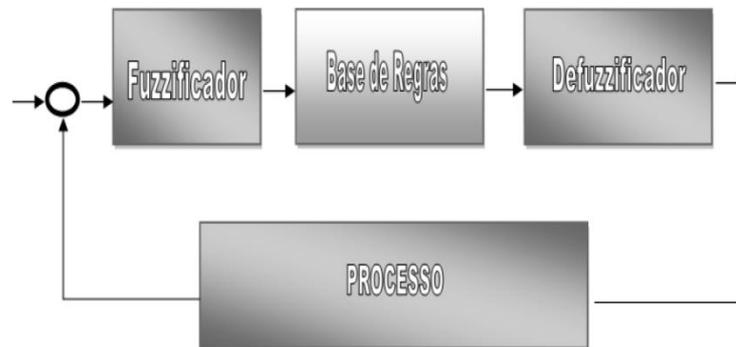


Figura 8 – Modelo de King e Mandani
 Fonte: Adaptado de King e Mamdani (1977).

A ação de controle do *Fuzzy* consiste em etapas que são características de sua arquitetura interna. A iteração segue de acordo com o procedimento:

- A entrada advinda de instrumentos do processo (sensores) possui um valor numérico;
- Este valor numérico passa por um processo de fuzzificação onde irá ser convertido para uma variável linguística através de funções de pertinência indexadas a variável de entrada;
- A variável linguística é classificada e inserida em um contexto de regras de comportamento exigidas por projeto;
- O resultado da inferência de regras é outra variável linguística para uma variável de saída. Esta passará pelo processo de defuzzificação, resultando em um valor numérico de saída;
- O valor numérico é aplicado à planta para controle.

A utilização de sistemas *Fuzzy* pode ser encontrada em diversas áreas, desde aplicações em engenharia de controle (navegação robótica, controle nível de tanques), equipamentos eletrônicos (câmeras fotográficas, lavadoras de roupas) até na determinação diagnóstica de doenças através de sintomas.

Existe uma série de sistemas e processos em que a aplicação do sistema *Fuzzy* pode ser altamente eficiente, como em sistemas complexos de difícil modelagem, sistemas que utilizam da percepção humana para gerarem entradas e saídas, entre outros (MCNEILL, THRO, 1994 apud MARRO ET AL., 2011);

3.2.2 Mapas Cognitivos Fuzzy

Os Mapas Cognitivos *Fuzzy* (FCM) foram propostos por Kosko (1986) baseado nas premissas identificadas por Axelrod (1976) sobre as relações causais presentes na elite política norte-americana. Estas premissas foram dispostas como a maneira de representar conhecimento na forma de palavras, ideias e tarefas sobre um determinado conceito e o modo como cada uma dessas formas afetam-no. Os mapas podem ser representados pela teoria de grafos, nos quais uma estrutura de crenças pode ser empregada por meio de expressões linguísticas interligadas por relações causais.

Estes mapas são sistemas muito utilizados para uma representação visual de conhecimento. Os grafos formam uma rede que relaciona conceitos e as ligações entre estes são variáveis *Fuzzy* que expressam a relação linguística através de pesos chamados de nível de causalidade.

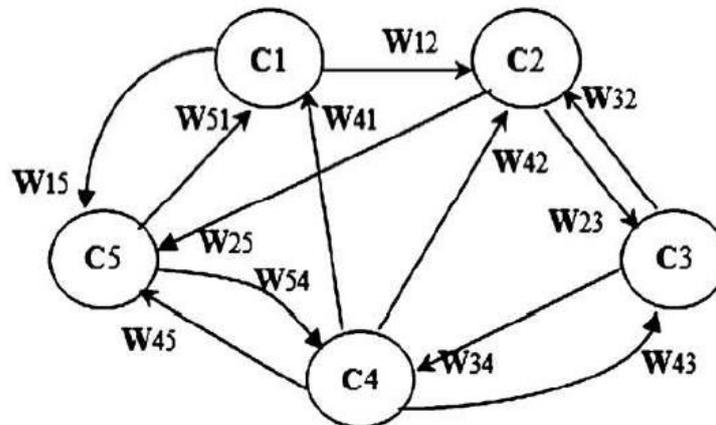


Figura 9 – Estrutura em grafo (FCM)
Fonte: Stylios, Geogopoulos, Groumpos (1999).

A Figura 9 demonstra um exemplo de FCM com cinco conceitos com relações causais dispostas entre si, representadas pelas letras W. Para as redes *feedforward*, o FCM pode também ser interpretado como uma rede neural, onde o conceito pode ser ativado por uma relação *on-off* e as relações causais são regras *Fuzzy* ponderadas, como as sinapses que interligam os neurônios. O FCM pode também possuir ciclos, denominados *feedback*. Quando o *feedback* é presente, as relações

causais atualizam-se fluindo nos ciclos e então o FCM é caracterizado como um sistema dinâmico (Kandasamy e Smarandache, 2003).

Os pesos indexados às conexões do FCM são ajustados a cada iteração até que atinjam a estabilidade, apresentando baixo erro entre uma iteração e a anterior. Os valores referentes ao exemplo da Figura 9 são dispostos da seguinte maneira:

$$W = \begin{bmatrix} 0 & w_{12} & 0 & 0 & w_{15} \\ 0 & 0 & w_{23} & 0 & w_{25} \\ 0 & w_{32} & 0 & w_{34} & 0 \\ w_{41} & 0 & w_{43} & 0 & w_{45} \\ w_{51} & 0 & w_{53} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A_i = f \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (A_j \times W_{ji}) + A_i^{\text{anterior}} \right) \quad (12)$$

Na equação (12), n representa o número de nós existentes, W_{ji} representa os pesos sinápticos inerentes a cada conexão entre os conceitos C_i e C_j , ao passo que A_i representa o conceito C_i na iteração atual enquanto A_i^{anterior} representa o mesmo conceito, porém na iteração anterior. Tendo calculado os valores de todas as conexões, este é aplicado à função $f(\cdot)$ que é do tipo função sigmoide, como descrita a seguir:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}} \quad (13)$$

Sendo assim, o FCM difere-se de outros sistemas que são baseados em estruturas se/então, porém não descrevem a dinâmica das relações causais. Todo o conhecimento indexado é representado e calculado por operações de matrizes.

De acordo com as definições apresentadas, os Mapas Cognitivos *Fuzzy* podem ser considerados como um sistema híbrido, pois engloba conceitos de um grafo com relações causais advindos do sistema *Fuzzy* (MENDONÇA, ARRUDA e JUNIOR, 2011).

3.3 AJUSTE AUTOMÁTICO POR SISTEMAS INTELIGENTES

De acordo com o apresentado sobre controle adaptativo, a aplicação de sistemas inteligentes pode ser de grande importância para a tomada de decisão quanto ao ajuste dos parâmetros dos controladores. O escopo deste trabalho é aplicar o Sistema *Fuzzy* e os Mapas Cognitivos *Fuzzy* (FCM) para, através de conceitos linguísticos, possibilitarem um ajuste automático de maneira a atingir melhores resultados.

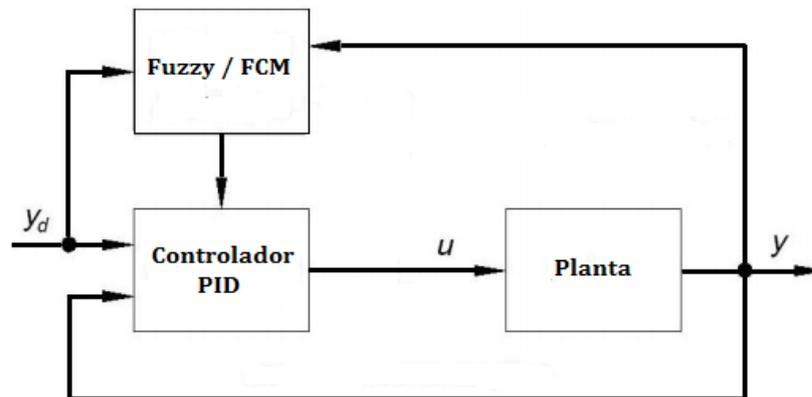


Figura 10 – Sistema adaptativo por Fuzzy e FCM
Fonte: autoria própria.

A Figura 10 ilustra um sistema baseado na definição de sistemas adaptativos utilizando ferramentas inteligentes para o ajuste dos parâmetros. A técnica em si consiste em avaliar o sinal de saída advindo da planta, realizar uma interpretação de parâmetros que meçam a qualidade do controle através das estradas da ferramenta inteligentes, realizar a tomada de decisão e aplicar a mudança nos parâmetros do controlador PID.

4 VALIDAÇÃO DA PROPOSTA

A utilização de ambientes computacionais para simulação de sistemas físicos é de grande importância para as aplicações em engenharia, uma vez que é possível visualizar características e dinâmicas e realizar testes com segurança para os envolvidos e o equipamento em questão.

Neste trabalho, para demonstrar a aplicação das técnicas inteligentes no ajuste automático dos parâmetros do controlador, foram utilizados seis sistemas dinâmicos lineares genéricos, de ordens diferentes, e um sistema não linear (fermentador alcoólico) como *testbed*.

4.1 SISTEMAS DINÂMICOS

As equações diferenciais são utilizadas para modelar matematicamente sistemas físicos em geral. As equações são do tipo linear ou não linear (sistemas com maior grau de complexidade) e possuem técnicas analíticas para solução.

Apesar de a proposta do trabalho considerar que não há conhecimento sobre o modelo matemático do processo, é necessário que se demonstre os sistemas simulados para identificação de suas características.

Inicialmente, considerando sistemas dinâmicos genéricos, este trabalho utiliza seis modelos de ordens diferentes (terceira, quarta e quinta ordens, sendo um sistema com zero e outro sem para cada ordem) utilizando-se do mesmo algoritmo com ajuste automático para todos.

Todos os modelos são estáveis para ganhos próximos de 0 e se tornam instáveis com o aumento do ganho em malha fechada.

As equações (14) e (15) expressam os sistemas de terceira ordem utilizados.

$$G(s) = \frac{0,2571}{s^3 + 1,9125s^2 + 1,2339s + 0,2571} \quad (14)$$

$$G(s) = \frac{1 - 0,5s}{2,861s^3 + 5,86s^2 + 3,99s + 1} \quad (15)$$

A Figura 11 mostra o diagrama do lugar das raízes para o sistema da equação (14). Com o aumento do ganho proporcional, os polos $s = -0,739 \pm 0,214i$ se deslocam para ∞ , tendo o ganho crítico $K_{cr} = 8,2$.

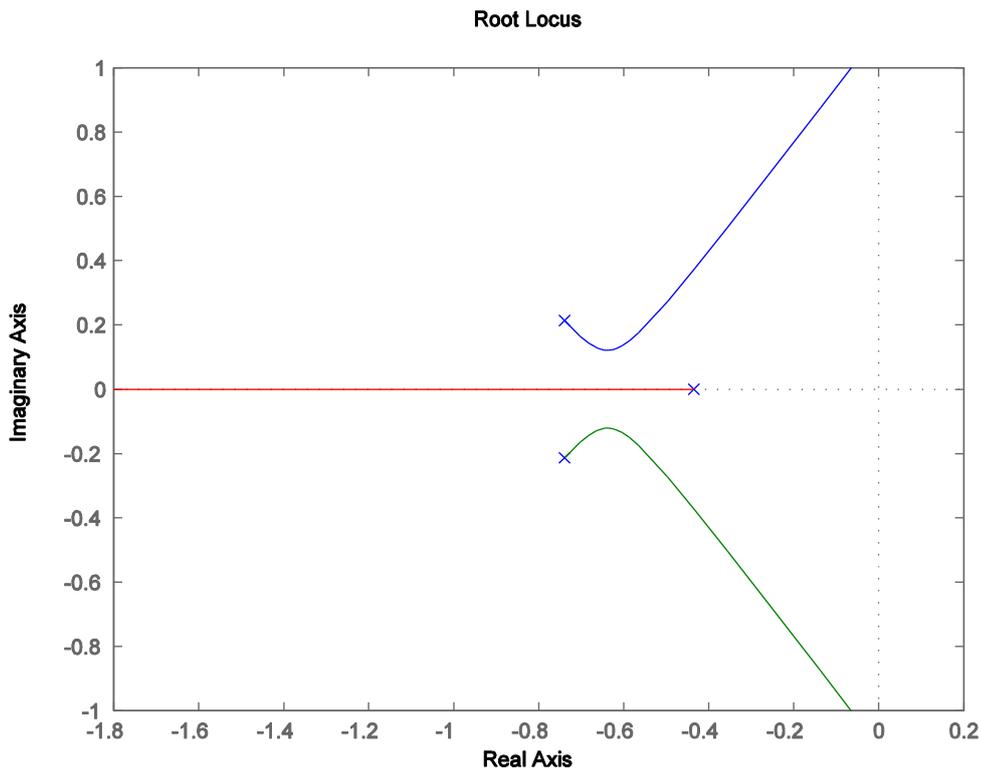


Figura 11 – Lugar das raízes do sistema de terceira ordem
Fonte: autoria própria.

A Figura 12 mostra o diagrama do lugar das raízes para o sistema da equação (15). Com o aumento do ganho proporcional, os polos $s = -0,519 \pm 0,277i$ se deslocam para o semiplano direito, tendo o ganho crítico $K_{cr} = 3,5$.

Nota-se a presença do zero no semiplano direito. O aumento do ganho proporcional faz com que os pólos se desloquem no plano s e busquem os zeros do sistema e/ou o ∞ . Com o zero no semiplano oposto, o polo conjugado mencionado acima cruza o eixo $j\omega$, alcançando a oscilação sustentada.

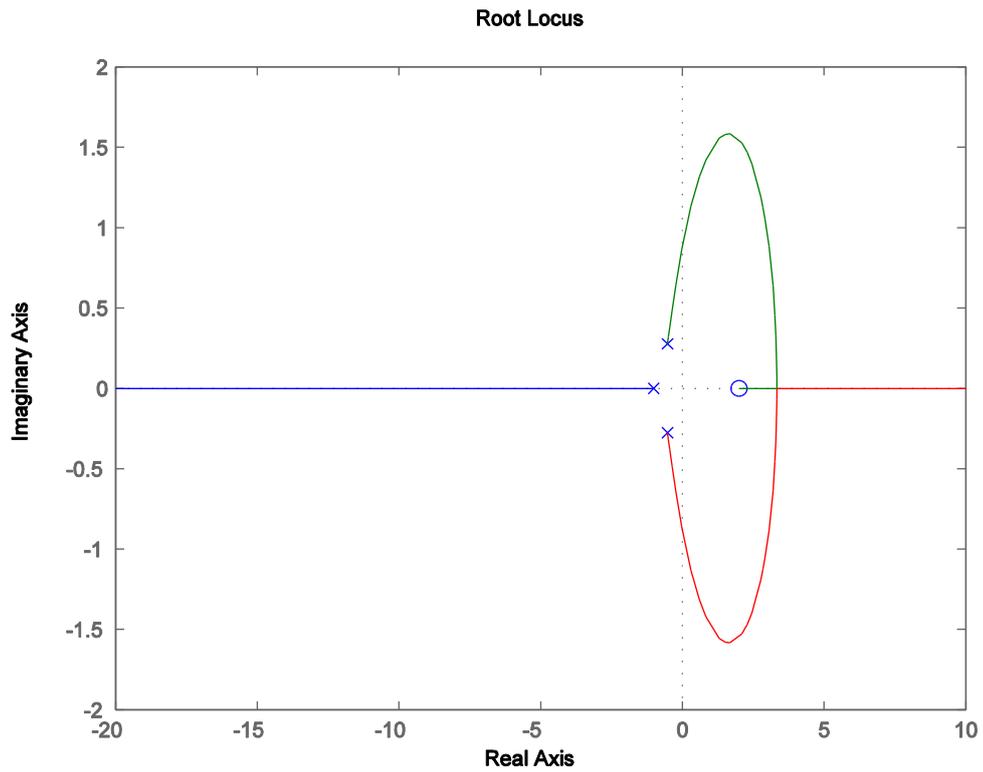


Figura 12 – Lugar das raízes do sistema de terceira ordem com zero em $s=2$
 Fonte: autoria própria.

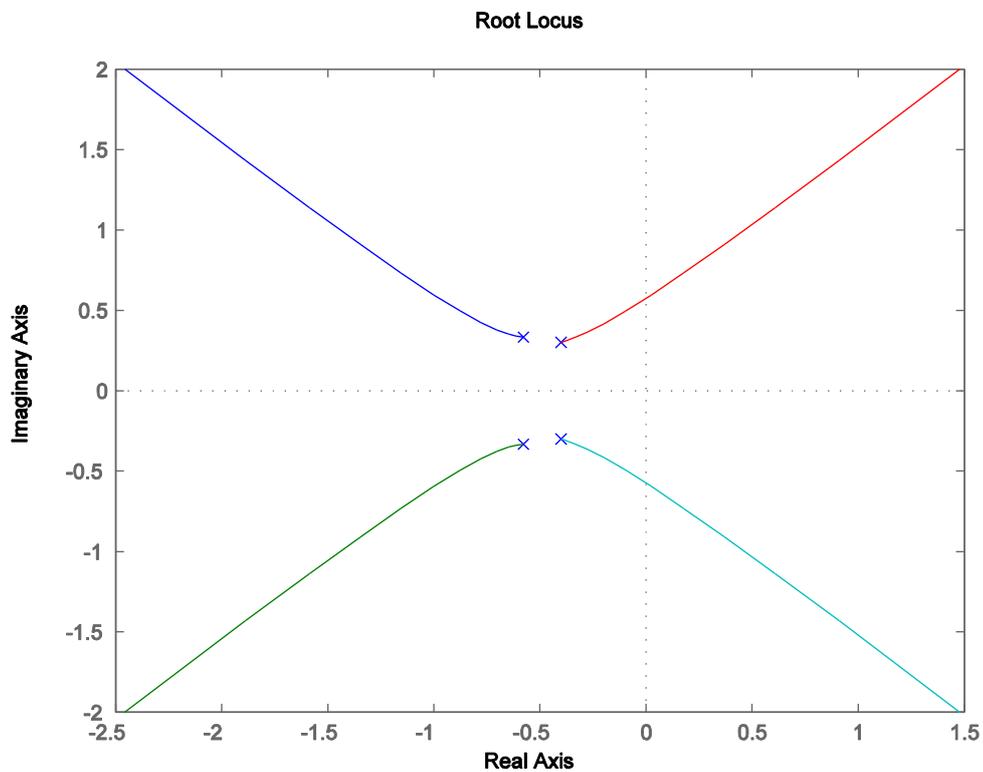


Figura 13 – Lugar das raízes do sistema de quarta ordem
 Fonte: autoria própria.

As equações (16) e (17) expressam os sistemas de quarta ordem utilizados.

$$G(s) = \frac{1}{9s^4 + 17,6s^3 + 14,57s^2 + 5,8s + 1} \quad (16)$$

$$G(s) = \frac{3,5s + 1}{0,96s^4 + 2,956s^3 + 4,05s^2 + 3s + 1} \quad (17)$$

Conforme variação do ganho proporcional, o polo conjugado $s = -0,4 \pm 0,3i$ se desloca em direção a $+\infty$, sendo o ganho crítico $K_{cr} = 2,8$. O diagrama do lugar das raízes para a equação (16) pode ser conferida na Figura 13.

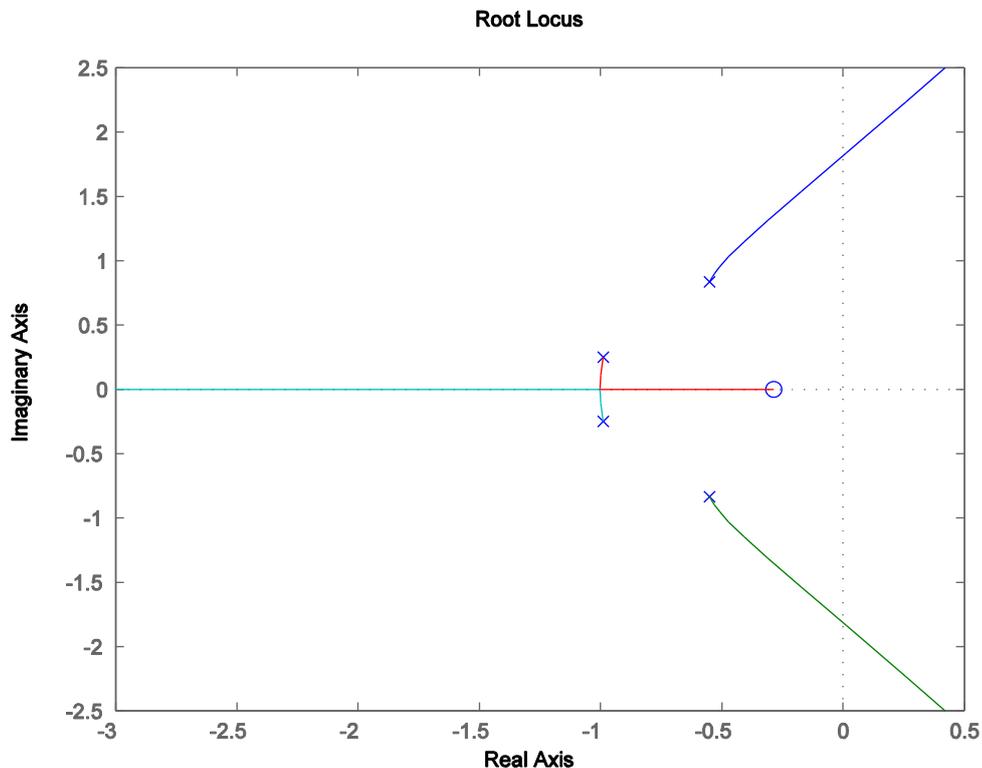


Figura 14 – Lugar das raízes do sistema de quarta ordem com zero em $s = -0,285$
Fonte: autoria própria.

A Figura 14 mostra o diagrama do lugar das raízes para o sistema de quarta ordem com zero. O polo conjugado $s = -0,55 \pm 0,835i$ se desloca em direção a $+\infty$ de acordo com a variação do ganho, sendo o ganho crítico $K_{cr} = 1,9$.

Os últimos sistemas genéricos utilizados estão representados pelas equações (18) e (19).

$$G(s) = \frac{1}{0,03519s^5 + 0,36812s^4 + 1,6889s^3 + 3,1516s^2 + 3,38s + 1} \quad (18)$$

$$G(s) = \frac{1 + 0,5s}{0,2178s^5 + 1,8445s^4 + 5,6856s^3 + 7,7089s^2 + 4,65s + 1} \quad (19)$$

A Figura 15 mostra o diagrama do lugar das raízes para o sistema de quinta ordem utilizado. Com o aumento do ganho proporcional, o polo conjugado $s = -0,988 \pm 1,27i$ se desloca em direção a $+\infty$, sendo o ganho crítico $K_{cr} = 3,2$.

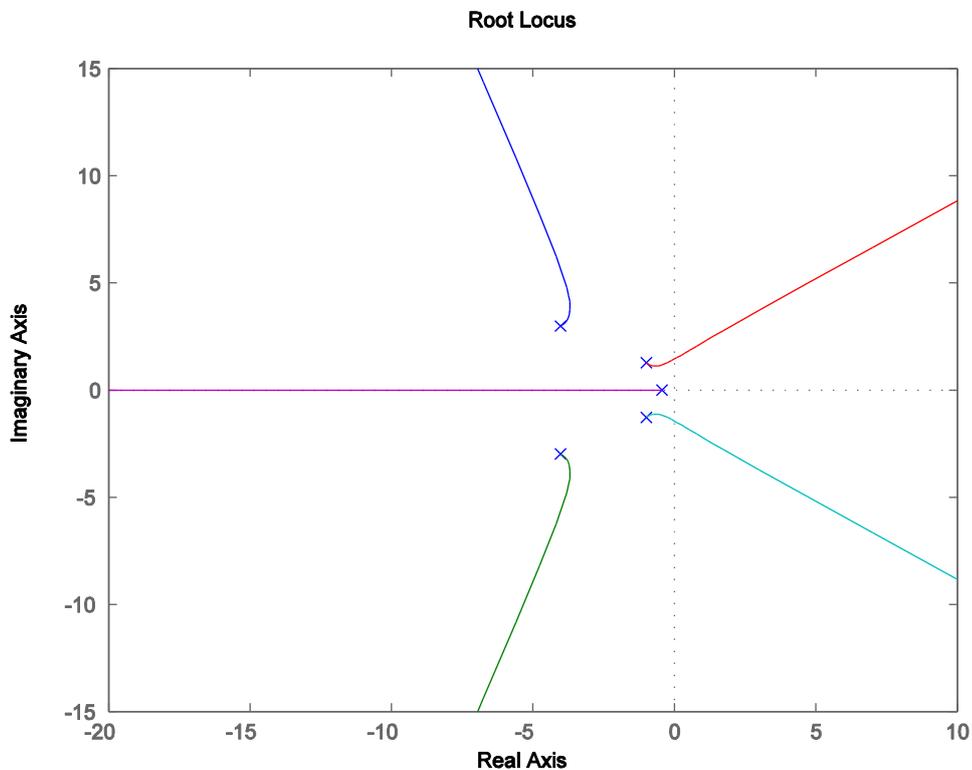


Figura 15 – Lugar das raízes do sistema de quinta ordem
Fonte: autoria própria.

O diagrama do lugar das raízes para o sistema de quinta ordem com zero (Figura 16) mostra que os polos $s = -0,5$ e $s = -1$ se deslocam em direção a semi plano esquerdo, possuindo ganho crítico $K_{cr} = 6,3$.

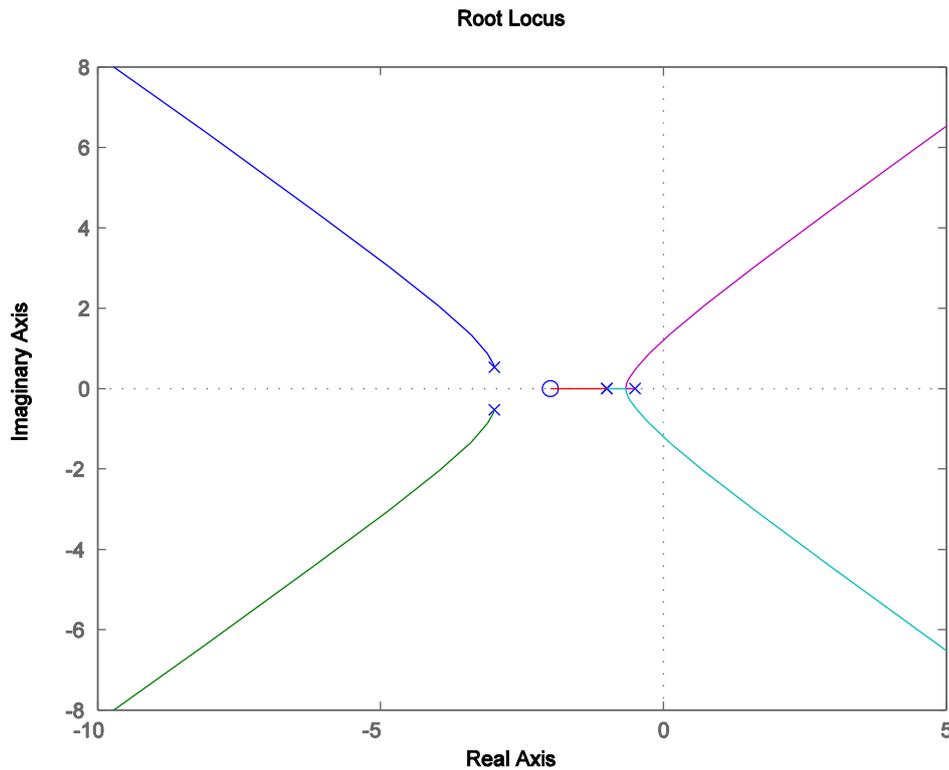


Figura 16 – Lugar das raízes do sistema de quinta ordem com zero em $s = -2$
Fonte: autoria própria.

4.2 PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA

O processo de fermentação utilizado neste foi primeiramente proposto por Maher (1995) e utilizado por diversos outros autores posteriormente (MENDONÇA, 2011). Este sistema é formado pelo controle de duas válvulas responsáveis por permitir o fluxo de substrato para dentro do tanque e o fluxo do produto fermentado para fora. A Figura 17 mostra um exemplo do tanque utilizando por Melo Junior et al. (2002), onde F_{in} é a válvula de entrada e F_{out} a válvula de saída.

A modelagem matemática que caracteriza a dinâmica do processo de fermentação é baseada na resolução de equações diferenciais de quatro variáveis de estado, as quais são: as concentrações de substrato (S), de biomassa (C), de produto (P) e o volume (V) presente no processo. As equações são as que seguem:

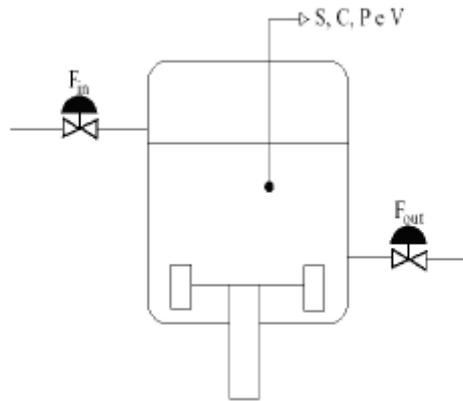


Figura 17 – Modelo do tanque de fermentação alcoólica
Fonte: Melo Junior et al. (2002).

As equações diferenciais abaixo modelam o comportamento dinâmico de todas as variáveis inseridas no tanque de fermentação.

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{C/S}}\mu C + \frac{F_{in}}{V}Sa - \frac{F_{out}}{V}S \quad (20)$$

$$\frac{dC}{dt} = \mu C - \frac{F_{out}}{V}S \quad (21)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{Y_{P/S}}{Y_{C/S}}\mu C - \frac{F_{out}}{V}P \quad (22)$$

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (23)$$

Onde:

- Sa : concentração de substrato da alimentação;
- $Y_{C/S}$ e $Y_{P/S}$: constantes de conversão de biomassa e produto, respectivamente;
- μ : função de crescimento da biomassa, dada por:

$$\mu = \mu_0 \frac{S}{K_s + S} \left(1 - \frac{P}{P_m}\right) \quad (24)$$

Onde:

- μ_0 : máxima taxa de crescimento;
- K_s : constante de Michaelis-Menton;
- P_m : coeficiente de inibição do produto.

O processo de fermentação possui certas particularidades que definem sua dinâmica. A resposta apresentada é não linear, de fase não mínima e tempo de acomodação grande. Isso implica em um processo demorado e que depende da quantidade de substrato disponível no tanque para fermentação.

Como apresentado, o processo é de difícil controle pois a válvula de saída controla o fluxo do produto que é resultado da etapa de fermentação. Ambas as válvulas devem estar em constante trabalho pois, caso o substrato não seja inserido, o processo se encerra e deve ser iniciado novamente.

Neste trabalho, foram utilizadas as equações (20) e (24), resolvidas pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem, para simular o processo de fermentação em questão (MENDONÇA, 2011).

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Os resultados a serem apresentados a seguir foram obtidos através da simulação de um algoritmo de adaptação utilizando sistemas inteligentes aplicados à parâmetros iniciais adquiridos pelo segundo método de Ziegler-Nichols e pela tabela proposta por Tyreus-Luyben. Os sistemas simulados foram apresentados no capítulo 4.

O desenvolvimento do algoritmo utilizando ambas as ferramentas inteligentes seguiu a mesma heurística para que a comparação entre as mesmas seja apurada. Os dados obtidos de cada experimento serão expostos após a apresentação dos resultados, de maneira a facilitar a comparação entre os métodos utilizados.

Para o início da rotina de ajuste automático, é necessário que se determine qual o valor do ganho proporcional inicial e o valor do passo. A partir destes dados, o algoritmo incrementa o valor do ganho de acordo com o passo até que a resposta da planta atinja a oscilação sustentada. A simulação é realizada utilizando a ferramenta Simulink, no ambiente Matlab®. A Figura 18 apresenta o *setup* da ferramenta, onde são inseridos o controlador e a planta controlada.

A Figura 19 demonstra o fluxograma do algoritmo para aquisição dos parâmetros iniciais e do ajuste automático.

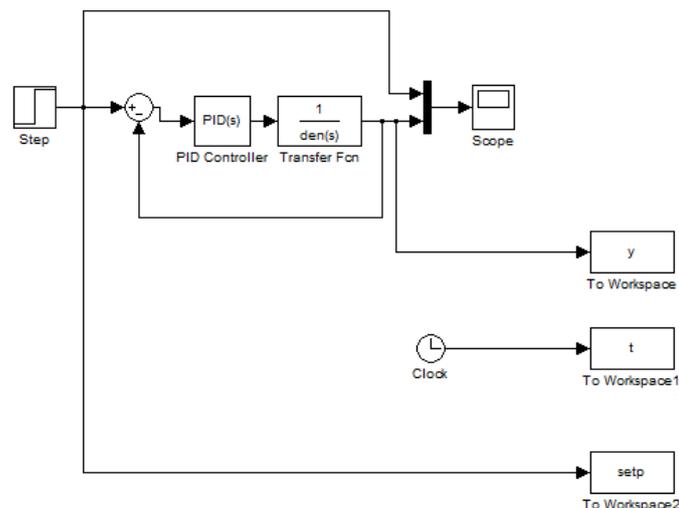


Figura 18 – Estrutura utilizada no Simulink
Fonte: autoria própria.

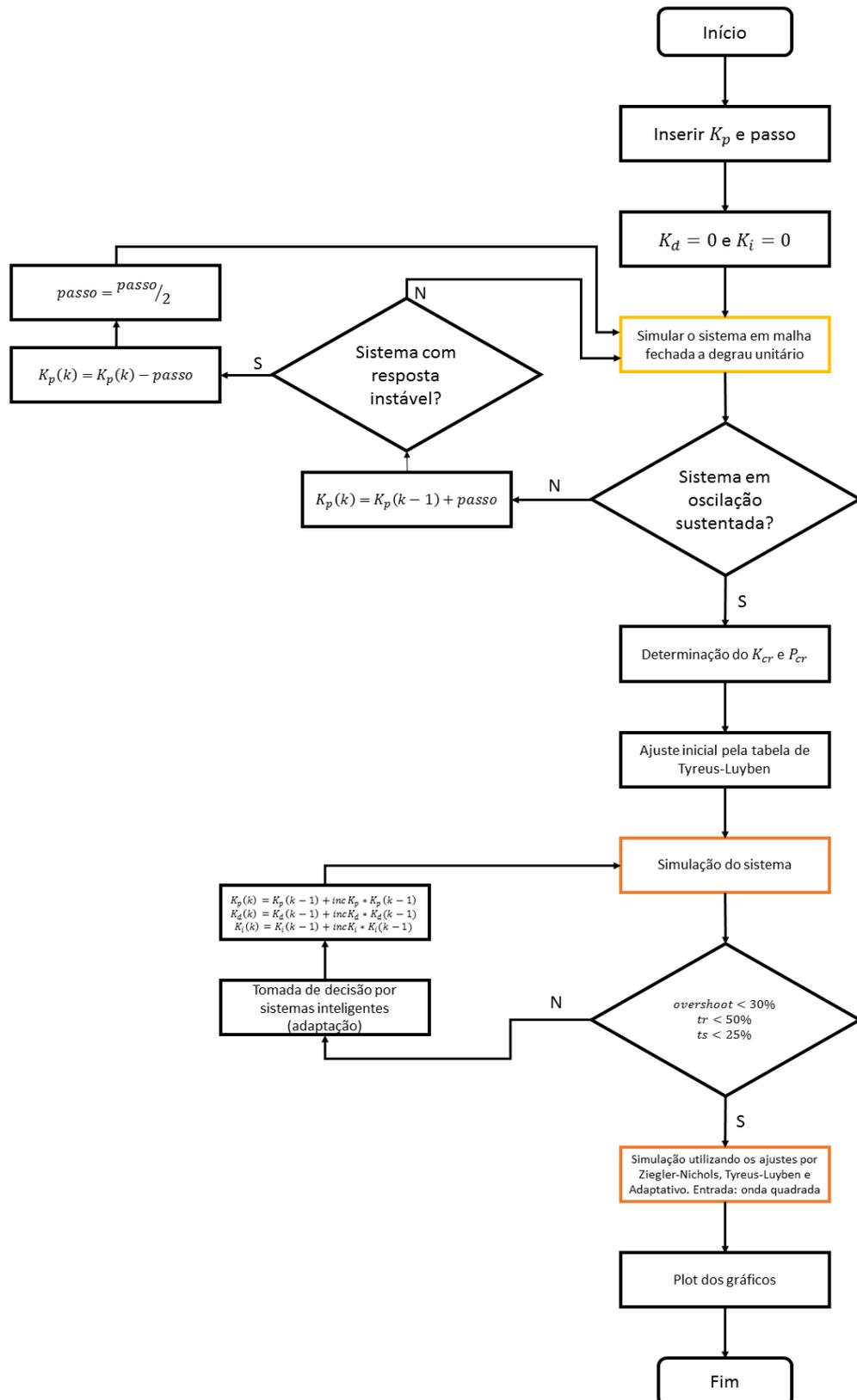


Figura 19 – Fluxograma do algoritmo proposto
Fonte: autoria própria.

O código também possui uma rotina de proteção contra a instabilidade. Caso o ganho proporcional seja incrementado acima do valor crítico, o algoritmo identifica a instabilidade, retorna o valor do ganho anterior e diminui o valor do passo. Em seguida, o ganho é incrementado novamente até que atinja o valor crítico.

Com a oscilação sustentada identificada, é determinado o valor do ganho crítico e do período crítico para aplicação na tabela de Tyreus-Luyben de maneira a adquirir o ajuste inicial dos parâmetros do controlador PID. Estes valores são aplicados ao sistema iniciando as iterações de sintonia. A cada iteração são identificados os valores do *overshoot*, do tempo de subida e do tempo de acomodação para a tomada de decisão através da ferramenta inteligente (*Fuzzy/FCM*). A saída do sistema inteligente é um valor de proporção que incrementa ou decrementa os parâmetros do controlador de acordo com a avaliação realizada por uma base de regras.

O tempo máximo de subida foi determinado como 10% do tempo total de simulação, que por sua vez é caracterizado como o tempo médio de acomodação total dos sistemas ajustados pelo método de Tyreus-Luyben. Já o tempo máximo de acomodação foi inserido como 50% do tempo total de simulação. As iterações continuam até a resposta esteja dentro de valores especificados que identificam um resultado satisfatório.

Após a aquisição dos parâmetros ajustados automaticamente, os valores são aplicados à planta para comparação com os resultados dos ajustes de Ziegler-Nichols e Tyreus-Luyben. Esta etapa é empregada para identificar a eficácia do ajuste adaptativo.

Por fim são gerados os gráficos representativos com a identificação de cada método e ferramenta.

5.1 SISTEMA FUZZY

O desenvolvimento do controlador *Fuzzy* é baseado em uma série de etapas nas quais é necessário identificar os requerimentos básicos para fazer interface com

o sistema em que está sendo empregado. Desta maneira, inicialmente relaciona-se quais são as entradas e saídas que são coerentes com sua aplicação.

Para o caso deste trabalho, conforme mencionado anteriormente, as mesmas entradas e saídas são utilizadas para ambos os sistemas inteligentes (Sistema *Fuzzy* e Mapas Cognitivos *Fuzzy*) na adaptação de sistemas de controle clássicos.

As variáveis de entrada foram determinadas de acordo com os parâmetros a serem analisados para medir a qualidade do controle, sendo elas:

- ✓ *Overshoot* (máximo sobressinal);
- ✓ *Tr* (tempo de subida);
- ✓ *Ts* (tempo de acomodação).

A Figura 20 demonstra as funções de pertinência, juntamente com as variáveis linguísticas que caracterizam a entrada “Máximo Sobressinal”.

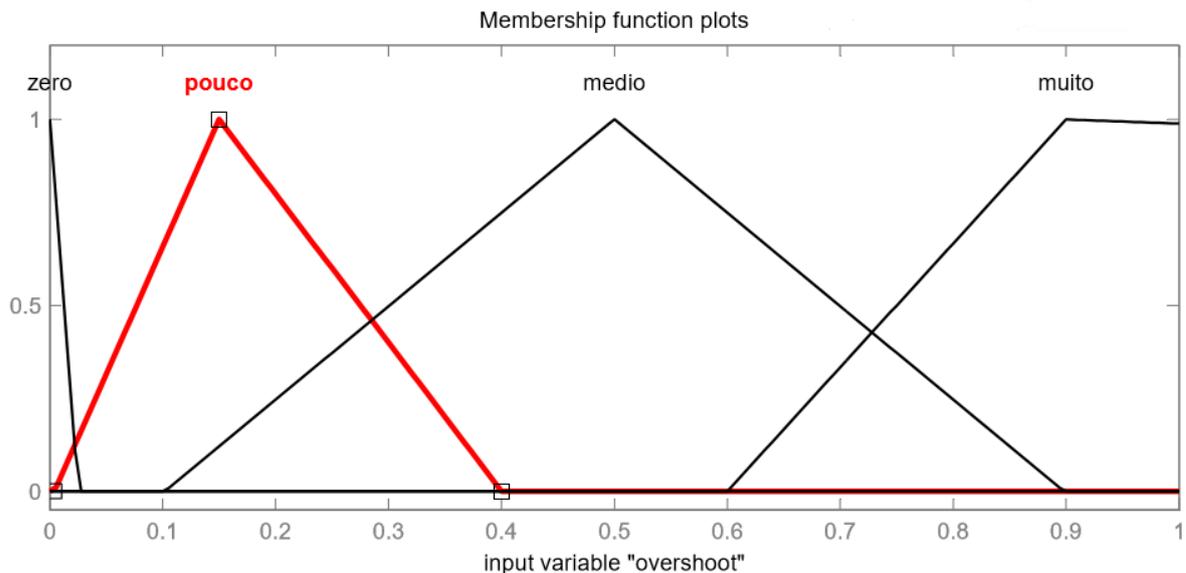


Figura 20 – Função de pertinência da variável de entrada “*Overshoot*”
 Fonte: autoria própria.

O universo de discurso desta entrada é unitário $[0,1]$, tendo seu máximo em 40% do *setpoint* aplicado. Para os sistemas dinâmicos foi aplicado degrau unitário como excitação de entrada.

O conjunto de valores e as funções de pertinência das entradas “Tempo de Subida” e “Tempo de Acomodação” são as mesmas mostradas na Figura 21.

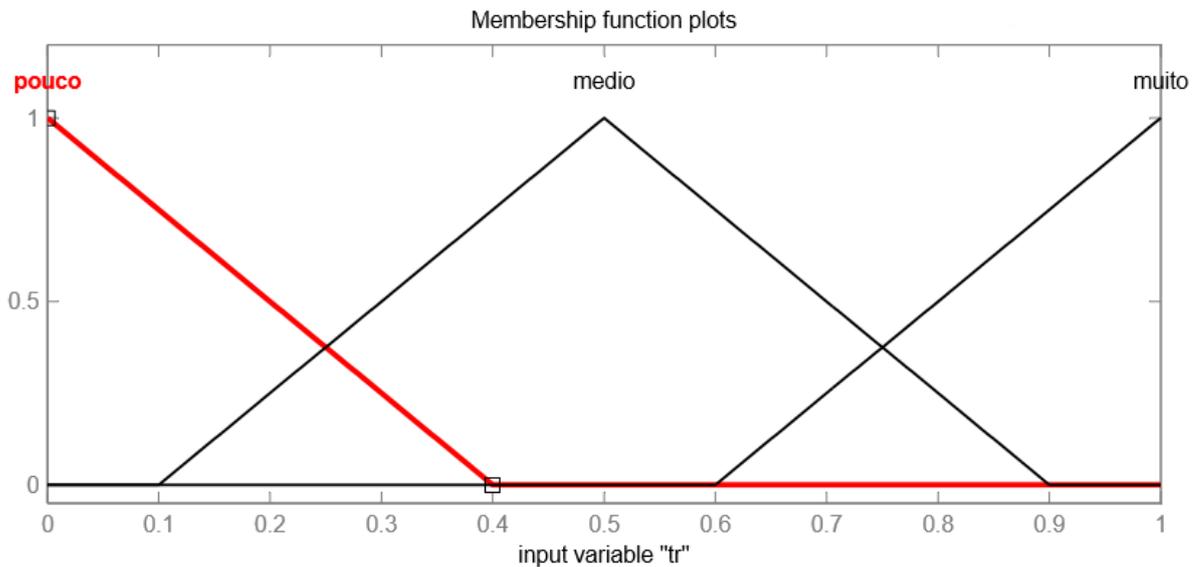


Figura 21 – Função de pertinência das variáveis de entrada “tr” e “ts”
 Fonte: autoria própria.

As variáveis de saída, por sua vez, foram caracterizadas como a variação dos parâmetros do controlador PID:

- ✓ Incremento de K_p , ou $incK_p$;
- ✓ Incremento de K_d , ou $incK_d$;
- ✓ Incremento de K_i , ou $incK_i$;

Uma vez que os parâmetros do controlador podem ser incrementados ou decrementados, de acordo com a avaliação das entradas do sistema, o universo de discurso das variáveis de saída possuem tanto valor negativo como positivo.

A estratégia é fazer com que os valores de K_p , K_d e K_i variem em uma ponte flutuante a cada iteração. A equação (25) exemplifica a aplicação para um parâmetro, que pode ser estendido aos demais.

$$kp(k) = kp(k - 1) + incK_p * kp(k - 1) \quad (25)$$

O incremento de K_p possui universo de discurso $[-1,3;1,3]$ (Figura 22), proporcionando variação de -130% a 130% do valor de K_p da iteração anterior. Da mesma forma, o incremento de K_d possui universo de discurso $[-0,5;0,5]$ (Figura 23)

e o incremento de K_i , $[-2;2]$ (Figura 24), valores adquiridos de maneira empírica durante as simulações. As variáveis das funções de pertinência foram caracterizadas como: “n_mu” (negativo muito); “n_p” (negativo pouco); “zero”; “p_p” (positivo pouco); e “p_mu” (positivo muito). Já para a saída do incremento de K_i , as funções foram caracterizadas como: “neg” (negativo); “zero”; “pos” (positivo).

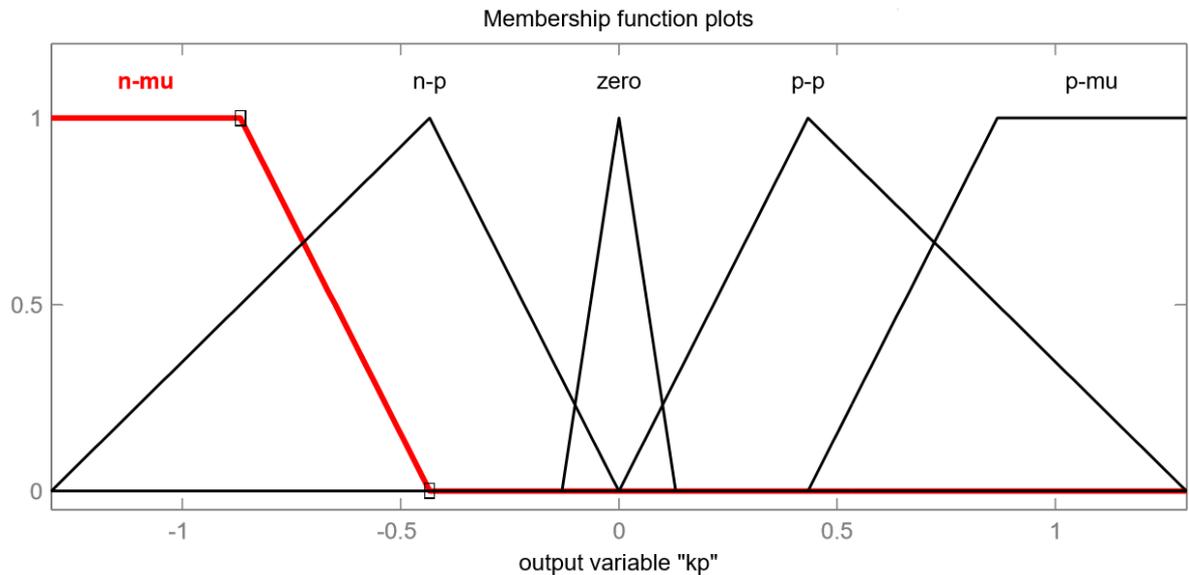


Figura 22 – Função de pertinência da variável de saída “Incremento de Kp”
 Fonte: autoria própria.

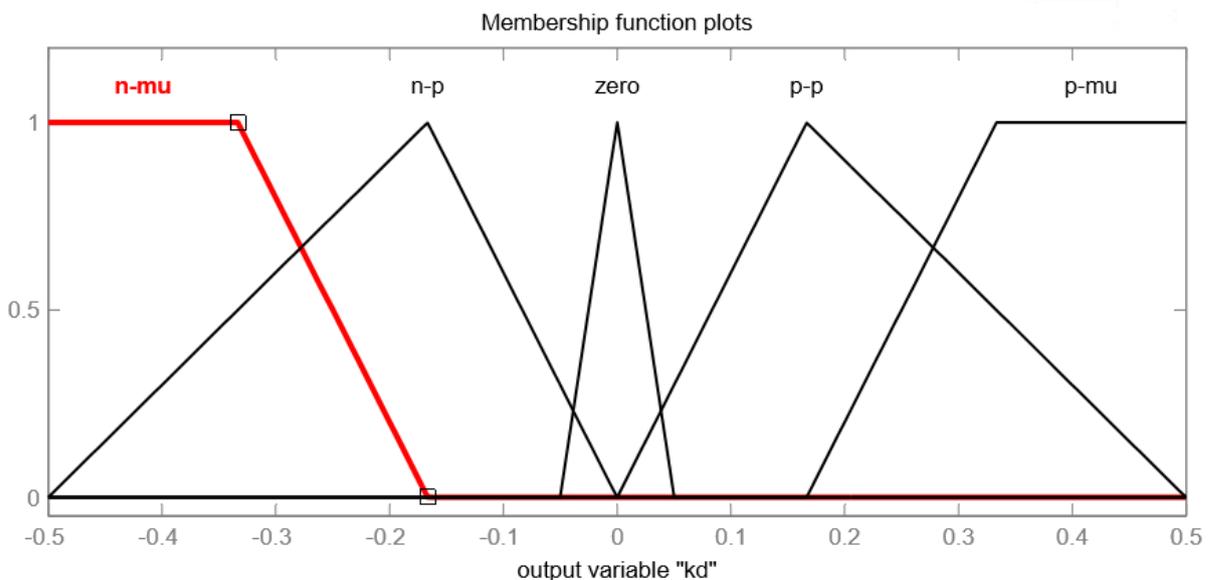


Figura 23 – Função de pertinência da variável de saída “Incremento de Kd”
 Fonte: autoria própria.

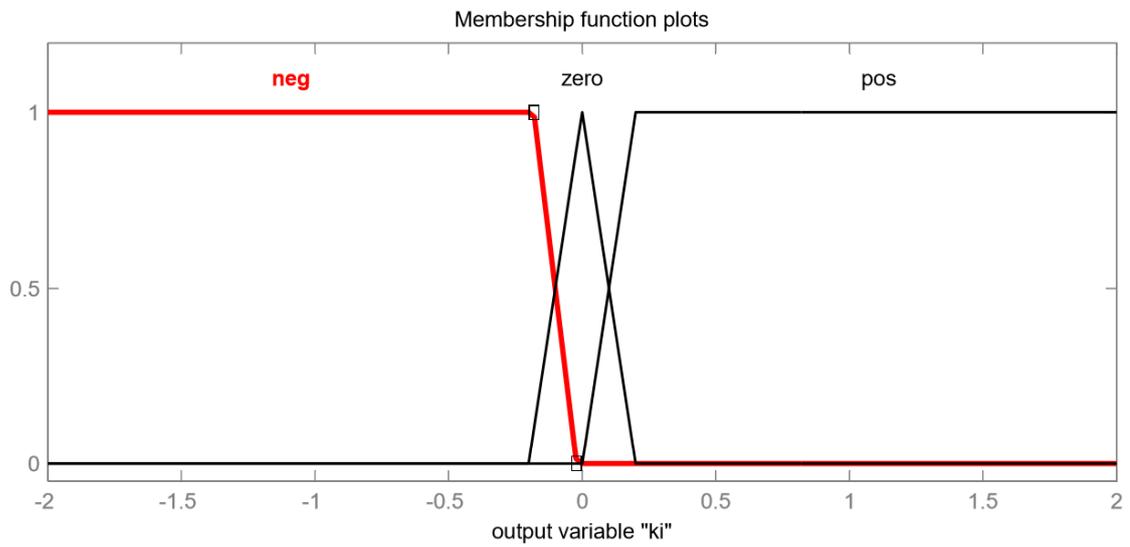


Figura 24 – Função de pertinência da variável de saída “Incremento de K_i ”
 Fonte: autoria própria.

Tabela 3 – Regras do Sistema Fuzzy

	ts					
	K_p / K_d					
<i>overshoot</i>	pouco		médio		muito	
zero	z	n_mu	z	n_p	p_p	z
pouco	z	n_p	n_p	z	n_mu	p_p
médio	n_p	z	n_p	p_p	n_mu	p_mu
muito	n_mu	p_p	n_mu	p_mu	n_mu	p_mu

Fonte: autoria própria.

Tabela 4 – Regras do Sistema Fuzzy

ts	K_i	tr	K_p
pouco	neg	pouco	z
medio	pos	médio	p_p
muito	pos	muito	p_mu

Fonte: autoria própria.

As regras de inferência foram desenvolvidas baseando-se na influência de cada parâmetro isolado na resposta do sistema, e podem ser conferidas nas Tabelas

3 e 4. O resultado objetivado é uma resposta com baixo sobressinal, baixos tempo de subida e acomodação, com mínima oscilação possível.

5.2 MAPAS COGNITIVOS FUZZY

O desenvolvimento do controlador PID ajustado por FCM seguiu a estratégia de análise de influência na resposta do processo para cada parâmetro observado de maneira individual.

De maneira análoga às regras do sistema *Fuzzy* desenvolvido em 5.1, as entradas relacionam-se com as saídas de acordo com a influência que cada uma possui. A Figura 25 apresenta o Mapa Cognitivo *Fuzzy* utilizado neste trabalho para a avaliação da resposta do sistema e tomada de decisão quanto ao ajuste dos parâmetros do controlador PID. As entradas se relacionam com as saídas da seguinte maneira:

- O *overshoot* influencia negativamente o incremento de K_p e positivamente o incremento de K_d ;
- O tempo de acomodação (t_s) influencia negativamente a K_p e positivamente a K_d e K_i ;
- Já o tempo de subida (t_r) influencia apenas a saída K_p positivamente.

As relações causais observadas na Figura 47 são caracterizadas como variáveis linguísticas. Para tal, foi-se estipulado que cada variável de entrada pode influenciar pouco, médio ou muito as variáveis de saída. Para o tratamento matemático, são atrelados valores numéricos às variáveis linguísticas, sendo pouco equivalendo a 0,07, médio a 0,19 e muito a 0,35.

Nota-se na equação (26) que as variáveis do sistema desenvolvido não possuem feedback interno, ou seja, as variáveis de saída irão influenciar as variáveis de entrada através da aplicação do controle PID em malha fechada.

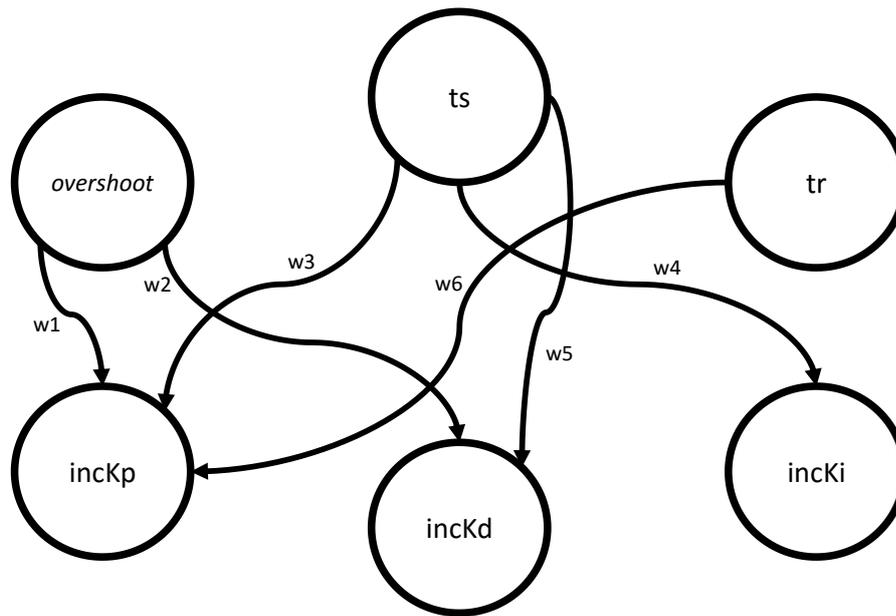


Figura 25 – Mapa Cognitivo Fuzzy
Fonte: autoria própria.

Os pesos das relações causais foram adquiridos de maneira empírica através da observação da resposta dos sistemas em simulação e da aproximação das regras do sistema *Fuzzy* utilizado anteriormente.

$$w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & w_1 & w_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_3 & w_4 & w_5 \\ 0 & 0 & 0 & w_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -0,34 & +0,19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,35 & +0,35 & +0,07 \\ 0 & 0 & 0 & +0,36 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Devido à utilização da função sigmoide como saída do FCM, a variação dos valores de entrada aproxima os valores de saídas a zero, porém nunca os tornam negativos, sendo incoerente com o desenvolvimento da estratégia proposta com a utilização do Sistema Fuzzy.

Para contornar essa premissa, os valores de saída do FCM foram aplicados a equações de reta que aproximam o resultado às curvas resultantes das saídas do Sistema *Fuzzy* desenvolvido anteriormente. Os coeficientes da equação de reta foram adquiridos comparando os valores extremos da saída do FCM e da saída do Sistema *Fuzzy* proposto.

$$Ajuste_{kp} = 5,877 * incKp - 2,585 \quad (27)$$

$$Ajuste_{kd} = 11,656 * incKd - 6,251 \quad (28)$$

$$Ajuste_{ki} = 20,374 * incKi - 11,514 \quad (29)$$

As Equações (27), (28) e (29) possibilitam que a tomada de decisão realizada pelo Mapa Cognitivo varie entre valores positivos e negativos para ajustar os parâmetros do controlador de acordo com os valores de entrada apresentados.

5.3 RESULTADOS DOS SISTEMAS SIMULADOS

As seções a seguir reúnem os resultados adquiridos na simulação de sistemas dinâmicos e do fermentador alcoólico utilizando o Sistema *Fuzzy* e Mapa Cognitivo *Fuzzy* desenvolvidos acima.

5.3.1 Sistema dinâmico de terceira ordem

5.3.1.1 Sistema Fuzzy

O primeiro sistema utilizado no algoritmo de adaptação foi o de terceira ordem descrito pela equação (14). Conforme restrição do trabalho, este sistema é estável e alcança oscilação sustentada com ganho proporcional $K = 8,2$, de acordo com a observação da função *rltool* do MatLab®. A oscilação sustentada (Figura 26) foi identificada pelo algoritmo com ganho crítico $K_{cr} = 8,25$ e período crítico $P_{cr} = 5,61s$.

O trabalho utiliza o segundo método de Ziegler-Nichols para obtenção dos ajustes iniciais.

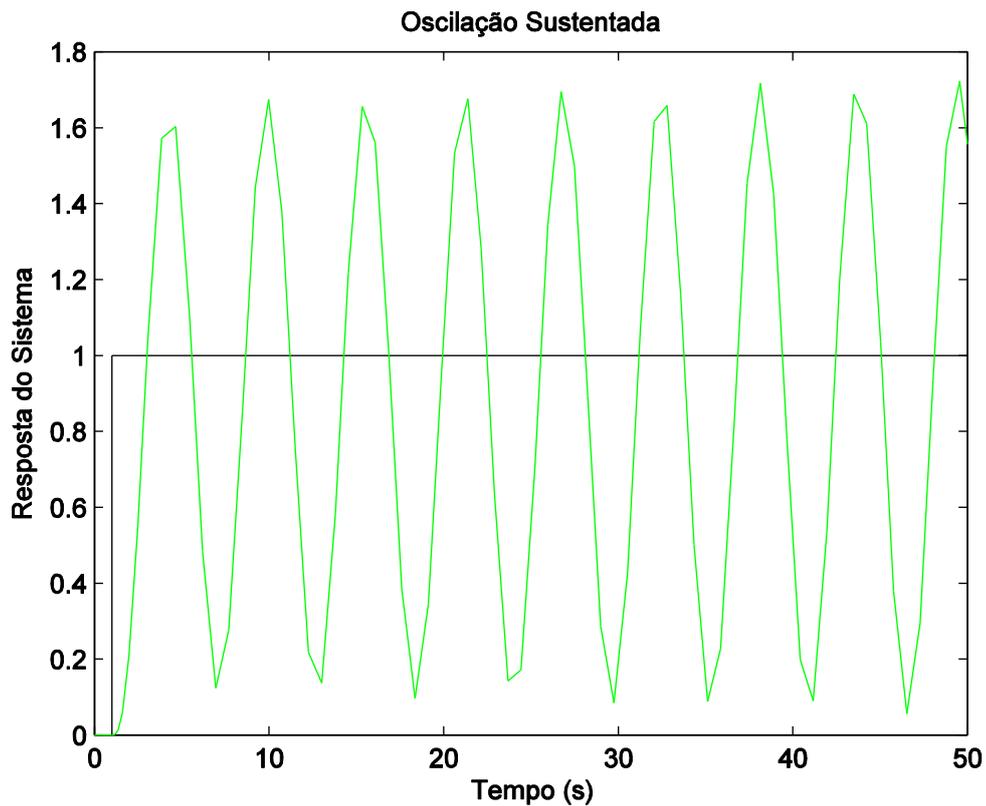


Figura 26 – Sistema de terceira ordem em oscilação sustentada
Fonte: autoria própria.

De acordo com a tabela proposta por Tyreus-Luyben, os valores dos parâmetros iniciais do ajuste foram $k_p = 3,75$, $k_d = 3,3406$ e $k_i = 0,3037$. Já pelo ajuste de Ziegler Nichols os valores encontrados foram $k_p = 4,95$, $k_d = 3,4726$ e $k_i = 1,764$.

O Sistema *Fuzzy* desenvolvido é aplicado utilizando como parâmetros iniciais o ajuste realizado pela tabela de Tyreus–Luyben. Após 6 iterações foram encontrados os parâmetros $k_p = 5,0521$, $k_d = 6,0231$ e $k_i = 1,2135$.

Observando a Figura 27 nota-se que o ajuste realizado pela lógica *Fuzzy* apresentou melhora sobre ambas as respostas dos ajustes propostos pelas tabelas mencionadas. Analisando o erro IAE para a entrada degrau unitário, o ajuste adaptativo obteve redução de 41,93% em relação ao ajuste de Ziegler e 50,62% em relação a Tyreus.

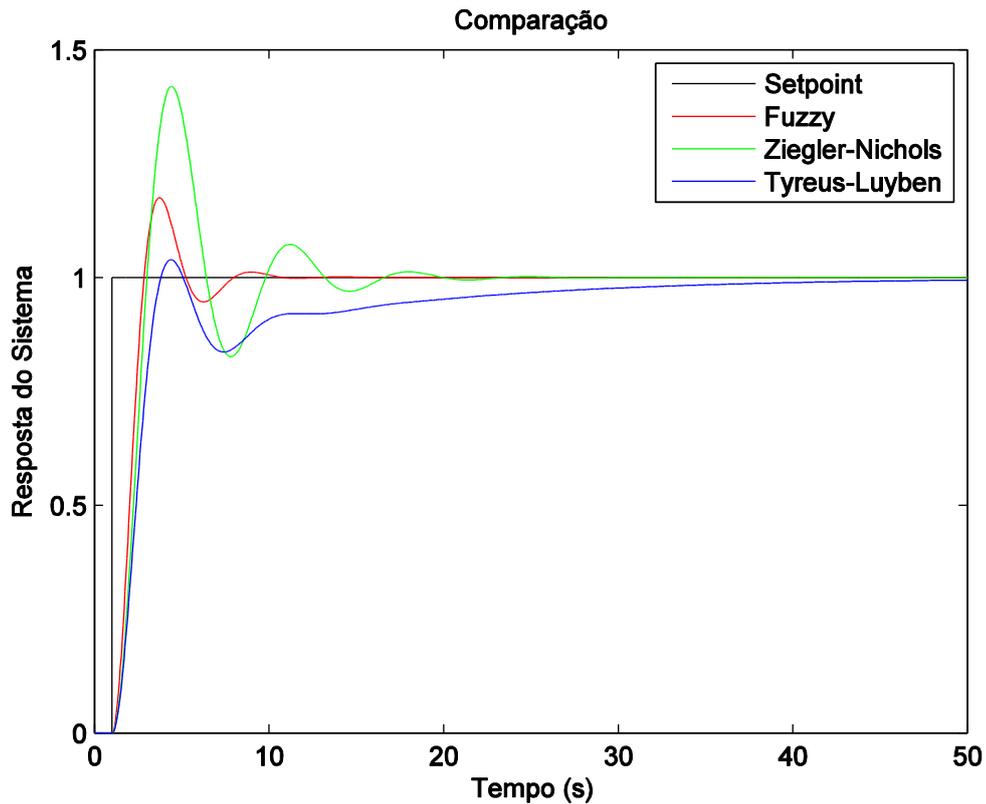


Figura 27 – Comparação entre as respostas do sistema de terceira ordem utilizando *Fuzzy*

Fonte: autoria própria.

A Tabela 5 dispõe os dados de qualidade de controle dos 3 métodos utilizados.

Tabela 5 – Resultados da simulação do sistema de terceira ordem (*Fuzzy*)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação <i>Fuzzy</i>
Erro IAE	59,186	69,6033	34,3685
Sobressinal	41,97%	3,91%	17,54%
Tempo de Subida	2,88 s	3,35 s	2,66 s
Tempo de acomod.	12,13 s	19,28 s	6,57 s

Fonte: autoria própria.

Nota-se que, para este sistema, a lógica *fuzzy* alcançou um ajuste que proporcionou uma resposta mais rápida que as anteriores, com um *overshoot* razoável. A fim de demonstrar o comportamento do sistema ajustado em uma

campanha, foi aplicado uma onda quadrada com 20 segundos de período e largura de pulso 50%, conforme a Figura 28.

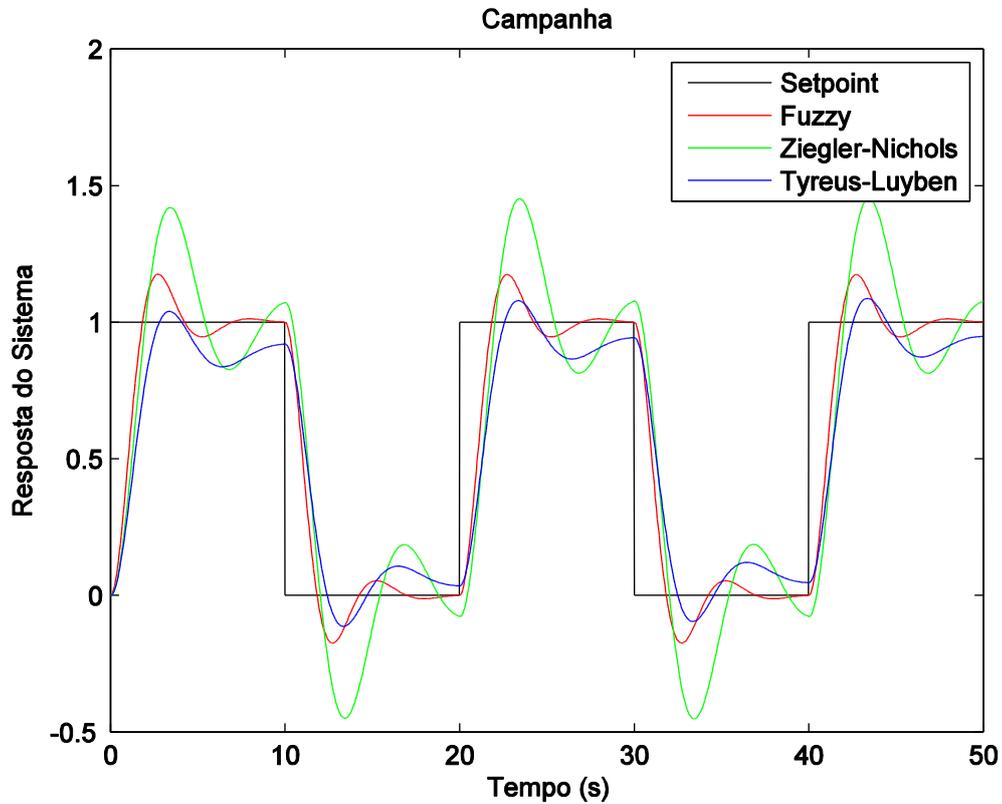


Figura 28 – Comparação da campanha do sistema de terceira ordem utilizando *Fuzzy*

Fonte: autoria própria.

O tempo de acomodação de 6,57 s do ajuste adaptativo garante que a resposta do sistema esteja acomodada dentro da largura de onda proposta pela campanha, o que não acontece com o ajuste dos dois outros ajustes utilizados.

5.3.1.2 Mapas Cognitivos Fuzzy

O processo de ajuste automático para o sistema utilizando FCM levou 9 iterações para determinar os parâmetros do controlador: $k_p = 8,1817$, $k_d = 7,9444$ e $k_i = 0,9494$.

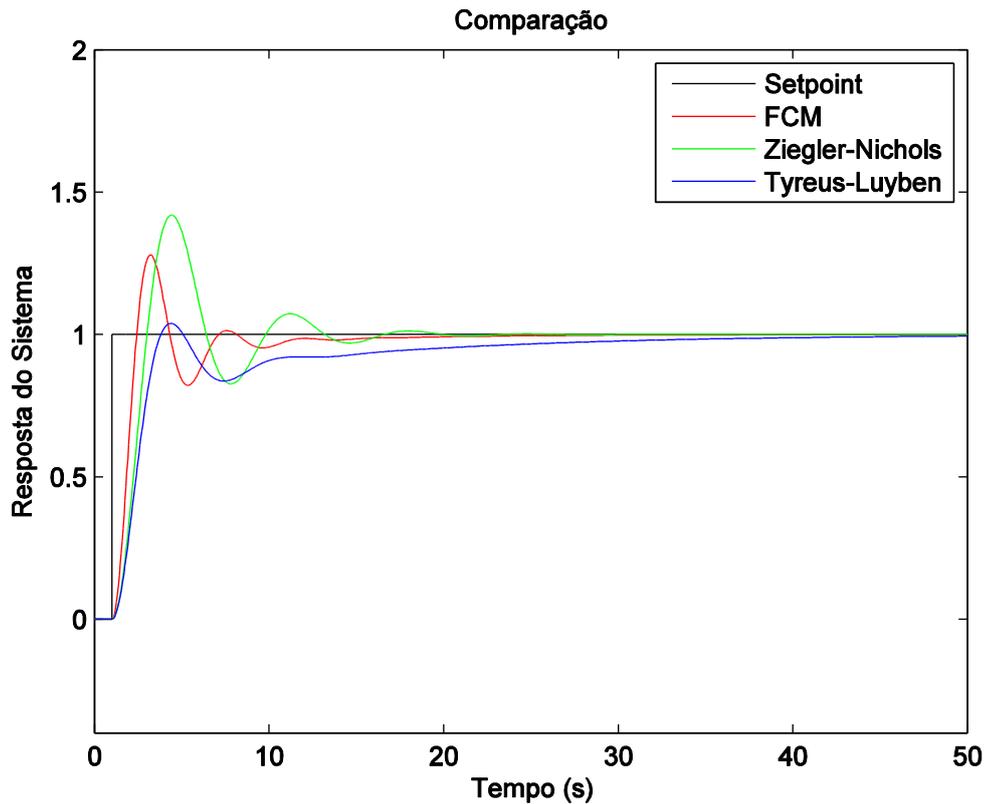


Figura 29 – Comparação entre as respostas do sistema de terceira ordem utilizando FCM
Fonte: autoria própria.

Assim como registrado pelo Sistema Fuzzy, o ajuste por FCM apresentou melhora sobre ambas as respostas dos ajustes propostos pela literatura (Figura 29). Analisando o erro IAE para a entrada degrau unitário, o ajuste adaptativo obteve redução de 30,8% em relação ao ajuste de Ziegler e 41,1% em relação a Tyreus.

A Tabela 6 reúne os dados obtidos da simulação deste sistema para os três métodos citados.

Tabela 6 – Resultados da simulação do sistema de terceira ordem (FCM)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação FCM
Erro IAE	59,186	69,6033	40,9787
Sobressinal	41,97%	3,91%	27,98%
Tempo de Subida	2,88 s	3,35 s	2,34 s
Tempo de acomod.	12,13 s	19,28 s	6,63 s

Fonte: autoria própria.

Nota-se que, para este sistema, o ajuste por FCM alcançou um ajuste que proporcionou uma resposta com melhor tempo de acomodação e melhor tempo de subida. Apesar do valor de *overshoot* ser inferior ao ajuste de Ziegler, ainda possui um valor considerado relativamente alto.

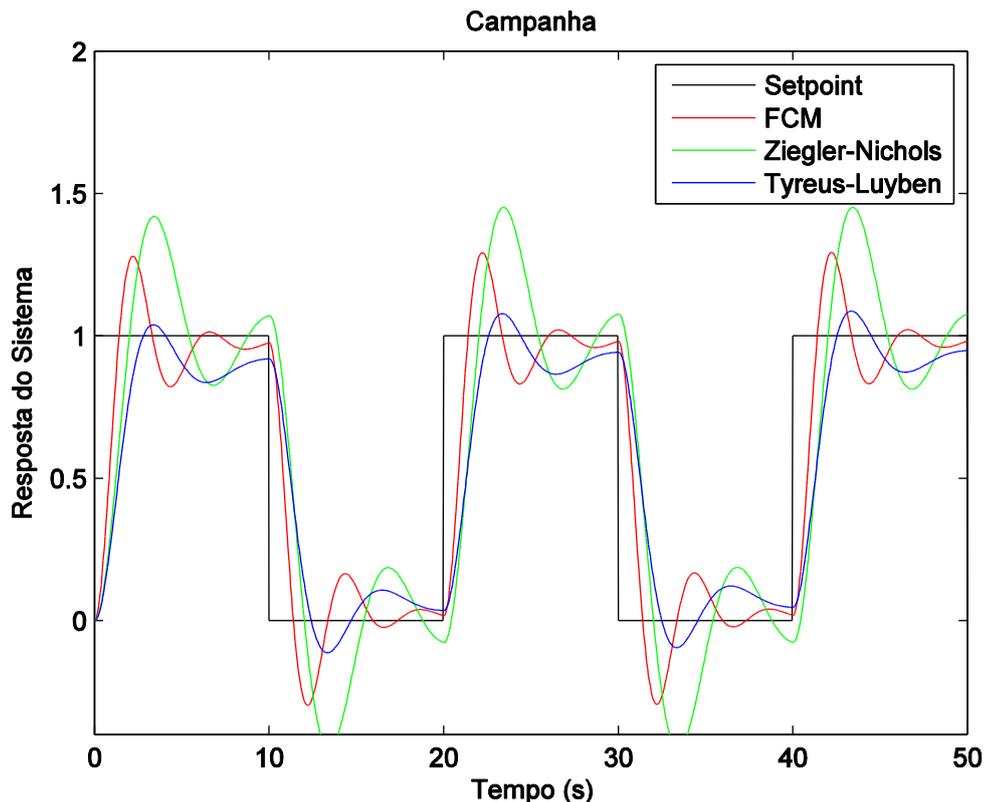


Figura 30 – Comparação da campanha do sistema de terceira ordem utilizando Fuzzy
Fonte: autoria própria.

O tempo de acomodação apresentado pelo ajuste utilizando FCM foi alcançado em 6,63s mantendo a resposta satisfatória (Figura 30), assim como o resultado do ajuste por *Fuzzy*.

Entre os sistemas testados, este foi o que apresentou o conjunto de resultados mais satisfatórios, provendo menor máximo sobressinal, combinado a um tempo de subida e tempo de acomodação reduzidos. Estes fatores contribuíram para uma significativa redução do erro acumulado, quando comparado aos métodos clássicos de ajuste.

5.3.2 Sistema dinâmico de terceira ordem com zero

5.3.2.1 Sistema Fuzzy

O sistema da equação (15) possui um zero em $s = 2$, adicionando mais uma variável. A oscilação sustentada (Figura 31) é alcançada com ganho proporcional $K = 3,5$, com identificação pelo algoritmo com ganho crítico $K_{cr} = 3,55$ e período crítico $P_{cr} = 7,1293$ s.

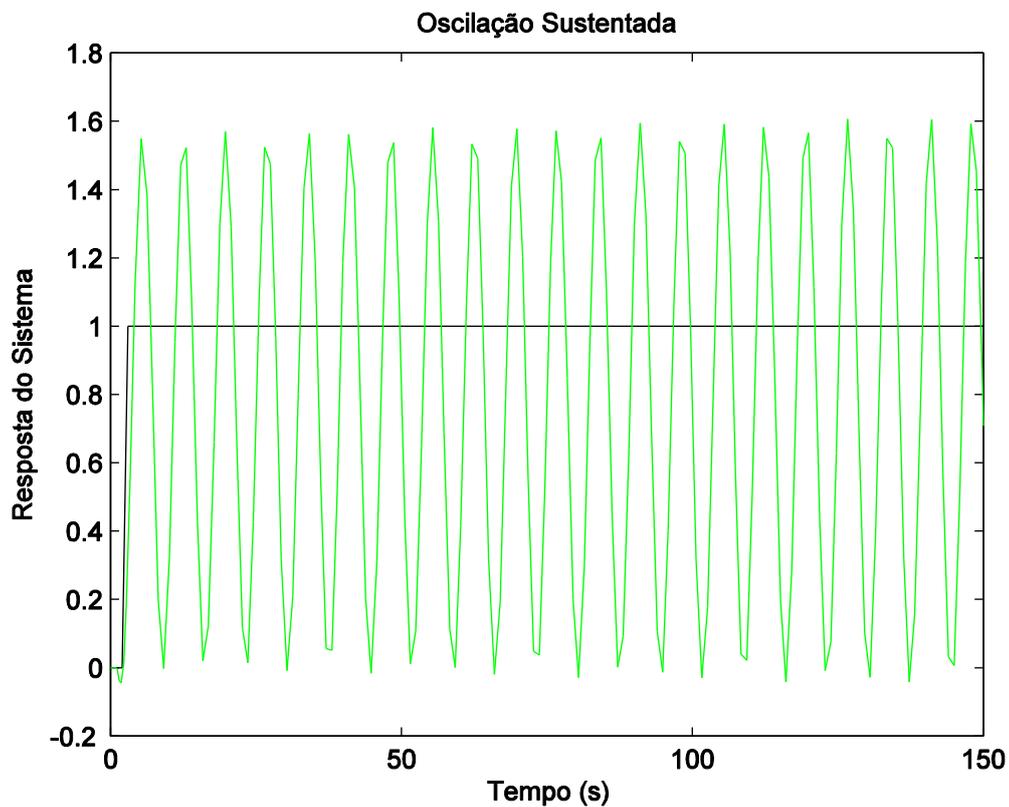


Figura 31 – Sistema de terceira ordem (com zero) em oscilação sustentada
Fonte: autoria própria.

De acordo com a tabela proposta por Tyreus-Luyben, os valores dos parâmetros iniciais do ajuste foram $k_p = 1,6136$, $k_d = 1,8261$ e $k_i = 0,1029$. Já pelo ajuste de Ziegler Nichols os valores encontrados foram $k_p = 2,13$, $k_d = 1,8982$ e $k_i = 0,5975$. Aplicando as regras *fuzzy* foram encontrados os parâmetros $k_p = 1,0407$, $k_d = 1,517$ e $k_i = 0,4306$ após 3 iterações.

Observando os resultados dispostos na Tabela 7, identifica-se uma boa diminuição dos tempos de subida e acomodação, em relação ao ajuste de Tyreus-Luyben. Esta variação foi responsável pela substancial diminuição do erro acumulado durante o ajuste, resultado da aplicação da tomada de decisão por *Fuzzy*.

Tabela 7 – Resultados da simulação do sistema de terceira ordem com zero (*Fuzzy*)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação <i>Fuzzy</i>
Erro IAE	64,0904	190,5449	71,2539
Sobressinal	25,38%	0%	8,5%
Tempo de Subida	3,79 s	32,07 s	5,64 s
Tempo de acomod.	10,71 s	47,9 s	13,17 s

Fonte: autoria própria.

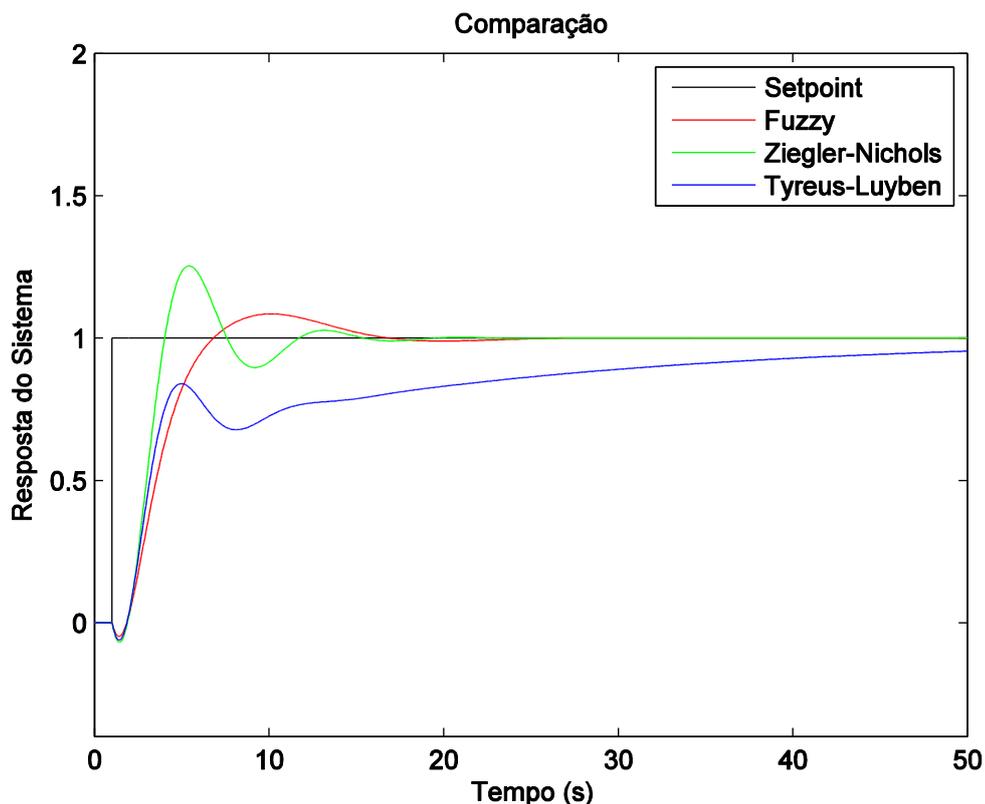


Figura 32 – Comparação entre as respostas do sistema de terceira ordem (com zero) utilizando *Fuzzy*

Fonte: autoria própria.

Observando o erro IAE, nota-se que o ajuste realizado pela lógica *Fuzzy* apresentou resultado satisfatório, com melhora de 62,6% em relação ao ajuste de

Tyreus-Luyben, apesar de leve mudança em relação a Ziegler-Nichols (aumento de 11,18%). Os valores de tempo de subida e acomodação permaneceram próximos a técnica mencionada, porém foi possível atingi-los com máximo sobressinal de apenas 8,5%. A Tabela 7 representa os resultados alcançados.

De acordo com os dados da Tabela 7, o ajuste de Tyreus resultou em uma resposta muito lenta, com alto tempo de acomodação e subida. Observa-se também que o ajuste por *Fuzzy* foi capaz de aumentar a velocidade da resposta sem que o *overshoot* fosse demasiadamente alto (Figura 32).

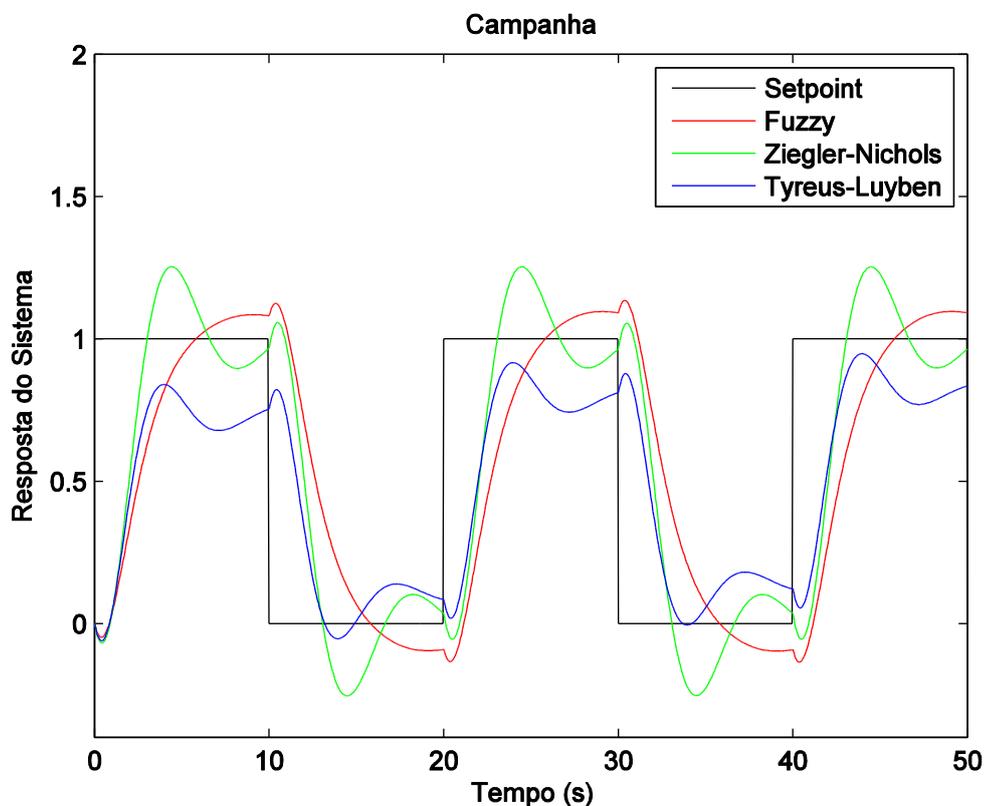


Figura 33 – Comparação da campanha do sistema de terceira ordem (com zero) utilizando *Fuzzy*

Fonte: autoria própria.

Em comparação com o ajuste de Ziegler, o ajuste pela ferramenta inteligente apresentou tempo de subida maior, porém com resposta comportada.

Devido ao tempo de acomodação ser maior que o tempo de largura de pulso da entrada (Figura 33), nota-se que o sistema não foi capaz entrar em regime durante toda a campanha.

5.3.2.2 Mapas Cognitivos Fuzzy

Aplicando as regras *FCM* foram encontrados os parâmetros $k_p = 2,5024$, $k_d = 1,5432$ e $k_i = 0,2642$ após 7 iterações.

Tabela 8 – Resultados da simulação do sistema de terceira ordem com zero (FCM)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação FCM
Erro IAE	64,0904	190,5449	91,8419
Sobressinal	25,38%	0%	20,45%
Tempo de Subida	3,79 s	32,07 s	3,86 s
Tempo de acomod.	10,71 s	47,9 s	18,04 s

Fonte: autoria própria.

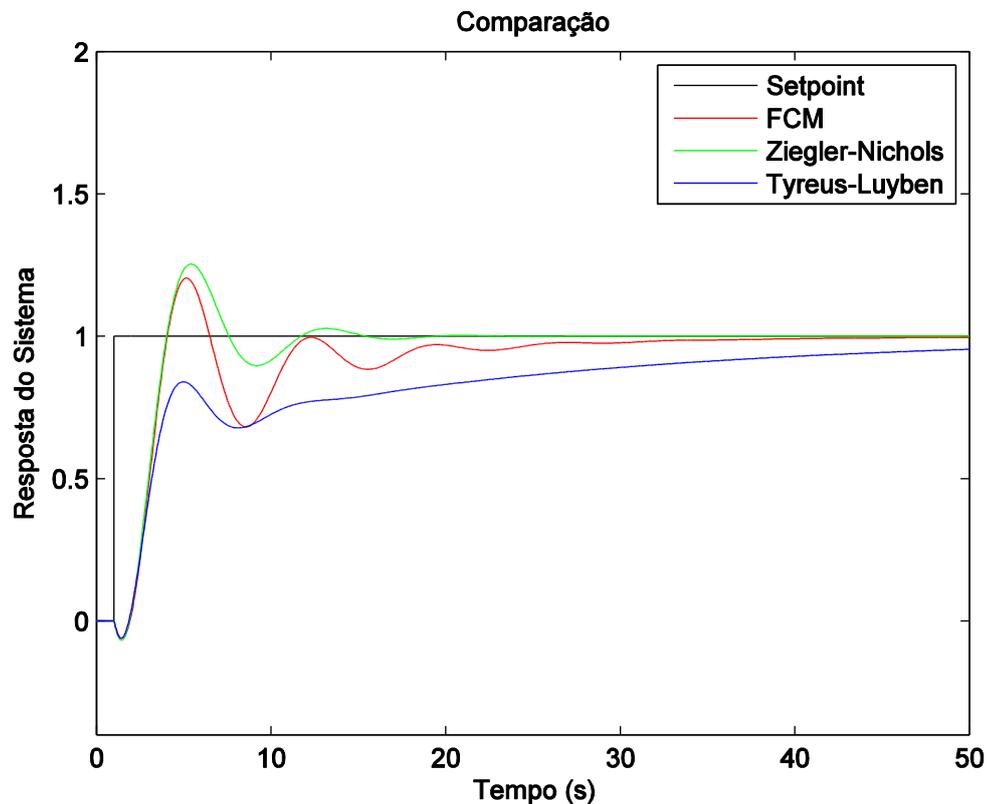


Figura 34 – Comparação entre as respostas do sistema de terceira ordem (com zero) utilizando FCM

Fonte: autoria própria.

Observa-se pelo erro IAE que o ajuste realizado pela Mapa Cognitivo *Fuzzy* apresentou melhor resultado sobre o ajuste de Tyreus-Luyben. Entretanto, devido à oscilação identificada, o resultado comparado ao ajuste de Ziegler-Nichols foi prejudicado (desempenho 27,8% inferior), também entrando em regime com tempo 68,9% maior. O resultados detalhados estão reunidos na Tabela 8.

Em comparação com o ajuste por *Fuzzy*, observa-se que há aumento na velocidade da resposta, gerando um tempo de subida 30,4% menor, porém causando maior *overshoot* e adicionando oscilação à resposta (Figura 34).

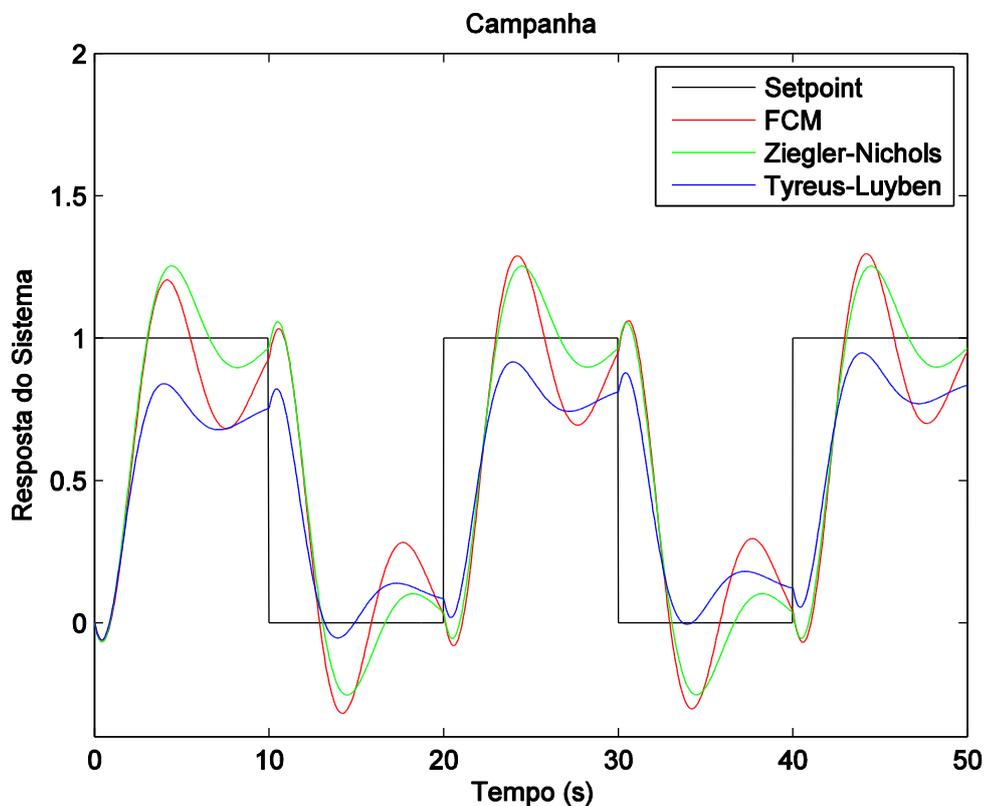


Figura 35 – Comparação da campanha do sistema de terceira ordem (com zero) utilizando FCM

Fonte: autoria própria.

Assim como na simulação da campanha com onda quadrada aplicada ao *Fuzzy*, o resultado do FCM também foi prejudicado pelo de acomodação (Figura 35). Todavia, ambos ainda apresentam superioridade sobre o ajuste de Tyreus-Luyben.

5.3.3 Sistema dinâmico de quarta ordem

5.3.3.1 Sistema Fuzzy

O sistema de quarta ordem (equação (16)) atinge oscilação sustentada com ganho proporcional $K = 2,8$, identificada pelo algoritmo com ganho crítico $K_{cr} = 2,825$ e período crítico $P_{cr} = 10,9648$.

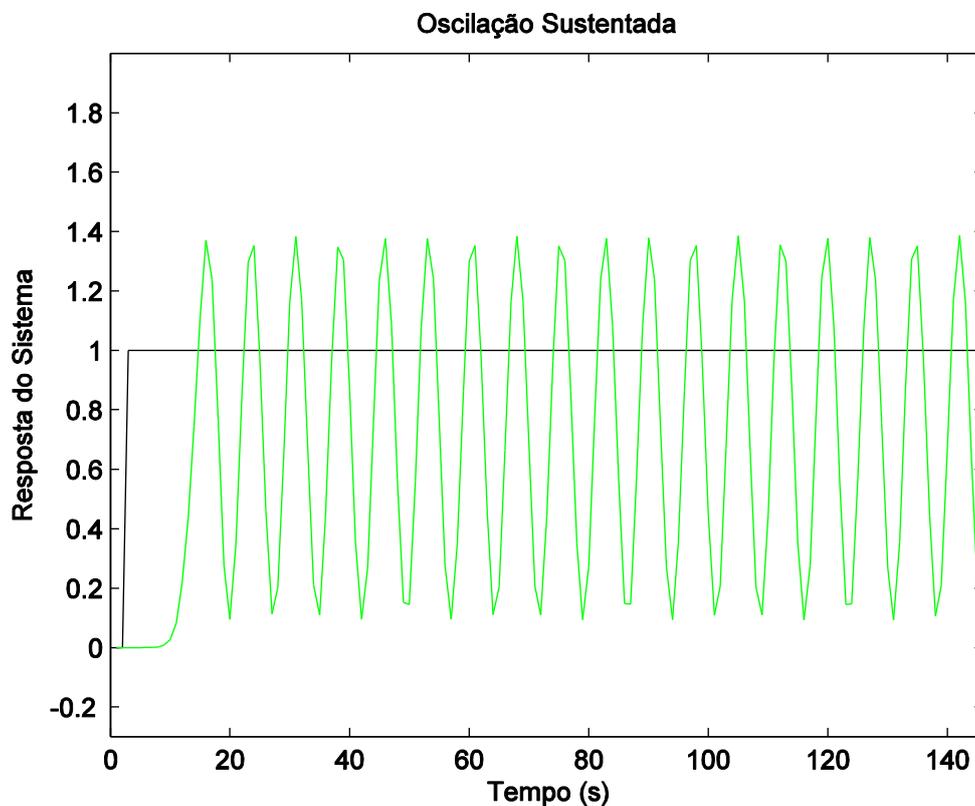


Figura 36 – Oscilação sustentada para o sistema de quarta ordem
Fonte: autoria própria.

Os valores dos parâmetros iniciais encontrados foram $k_p = 1,2841$, $k_d = 2,2349$ e $k_i = 0,0532$, por Tyreus-Luyben, e $k_p = 1,695$, $k_d = 2,3232$ e $k_i = 0,3092$, por Ziegler-Nichols. Após 3 iterações foram encontrados os parâmetros $k_p = 1,2948$, $k_d = 2,3616$ e $k_i = 0,2237$ através do controlador *Fuzzy*.

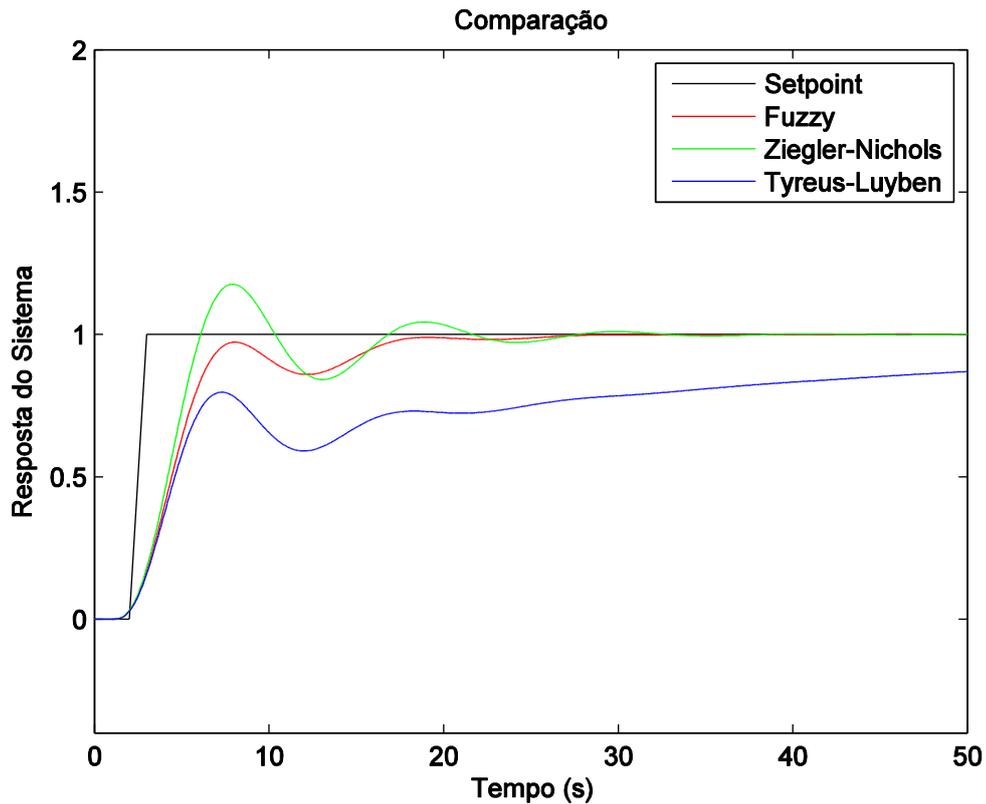


Figura 37 – Comparação dos ajustes para o sistema de quarta ordem utilizando *Fuzzy*

Fonte: autoria própria.

A Figura 37 demonstra que o ajuste realizado pela lógica *Fuzzy* apresentou resposta com *overshoot* nulo e leve oscilação no período transitório, porém com melhor resultado de maneira geral em relação aos outros dois métodos. Em relação ao erro IAE, o ajuste adaptativo obteve redução de apenas 1,64% quando comparado ao resultado do ajuste de Ziegler, porém apresentou uma melhora de 74,18% em relação a Tyreus, devido ao alto tempo de acomodação deste método.

A Tabela 9 mostra os dados de qualidade de controle dos 3 métodos utilizados.

Tabela 9 – Resultados da simulação do sistema de quarta ordem (*Fuzzy*)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação <i>Fuzzy</i>
Erro IAE	93,3943	355,8261	91,8589
Sobressinal	17,66%	0%	0%
Tempo de Subida	5,67 s	60,28 s	6,59 s
Tempo de acomod.	15,85 s	87,52 s	15,95 s

Fonte: autoria própria.

Nota-se que, para este sistema, a lógica *fuzzy* alcançou um ajuste que proporcionou pouca diferença no tempo de acomodação e tempo de subida em relação a Ziegler, entretanto foi capaz de manter o *overshoot* em 0%.

Aplicando os ajustes na campanha de ondas quadradas (Figura 38), vê-se uma resposta com baixo desempenho, devido a seu alto tempo de acomodação em relação ao período da perturbação de entrada.

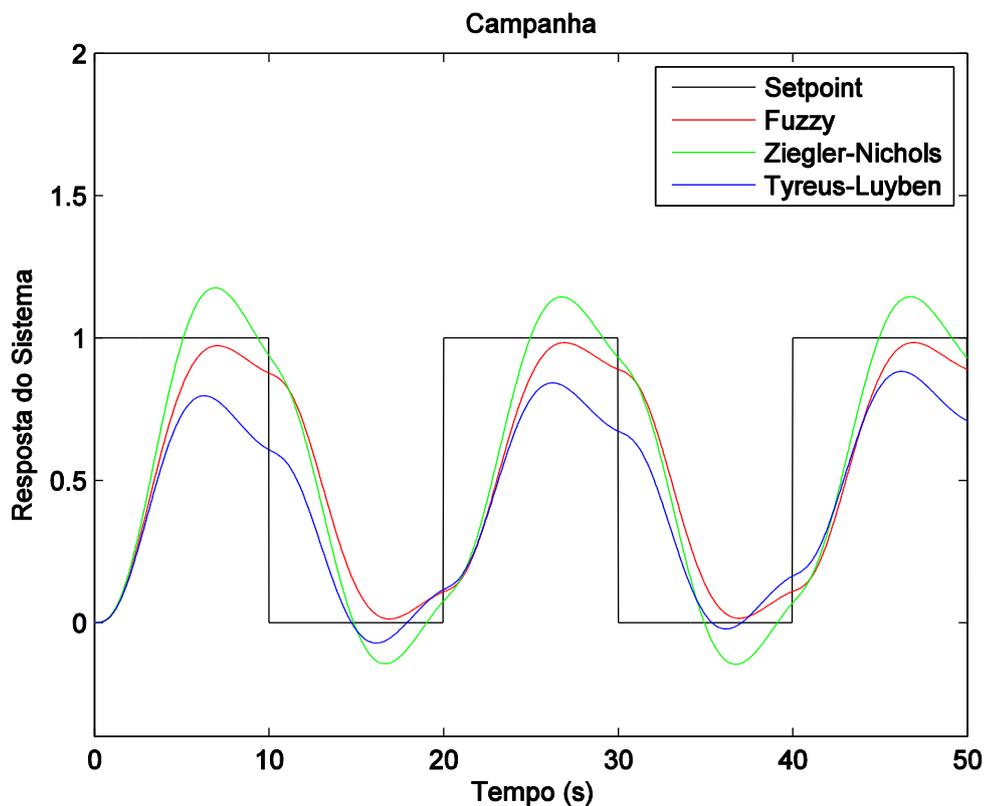


Figura 38 – Comparação dos ajustes na campanha para o sistema de quarta ordem utilizando *Fuzzy*

Fonte: autoria própria.

O tempo de subida, aliado ao *overshoot* da resposta, impossibilitaram um resultado satisfatório para a campanha com mesma característica dos sistemas anteriores (período 20s). Essa é uma característica intrínseca a este sistema, que apresenta resposta com dinâmica mais lenta.

5.3.3.2 Mapas Cognitivos Fuzzy

Após 3 iterações foram encontrados os parâmetros $k_p = 2,0491$, $k_d = 2,0211$ e $k_i = 0,2307$ através do algoritmo utilizando FCM.

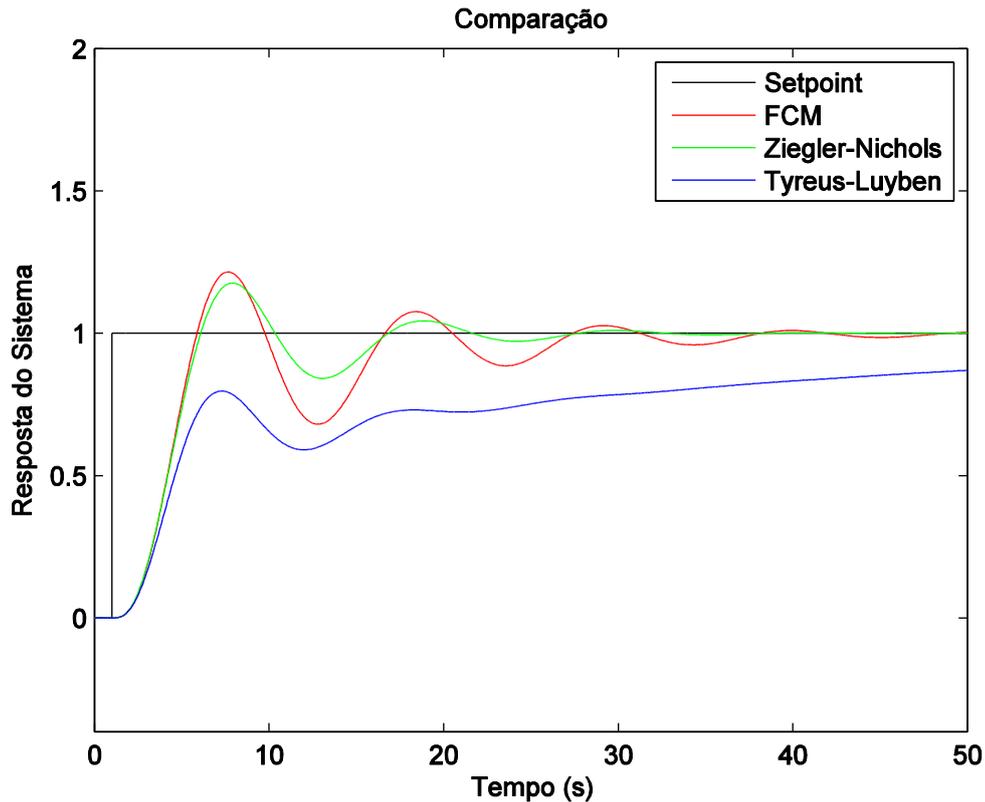


Figura 39 – Comparação dos ajustes para o sistema de quarta ordem utilizando FCM

Fonte: autoria própria.

Observa-se através da Figura 39 que o ajuste automático realizado pelo FCM apresentou *overshoot* mediano (21%) e com considerável oscilação no período transitório, o qual prejudicou mais uma vez o resultado final, estando com desempenho 29,1% inferior ao ajuste de Ziegler-Nichols. Por outro lado, apresentou melhora de 66,1% em relação ao ajuste de Tyreus-Luyben, quando observado o erro acumulado durante a campanha.

A Tabela 10 mostra os dados de qualidade de controle adquiridos através da resposta do ajuste automático por FCM.

Tabela 10 – Resultados da simulação do sistema de quarta ordem (FCM)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação FCM
Erro IAE	93,3943	355,8261	120,6017
Sobressinal	17,66%	0%	21,56%
Tempo de Subida	5,67 s	60,28 s	5,51 s
Tempo de acomod.	15,85 s	87,52 s	26,05 s

Fonte: autoria própria.

Em comparação com o resultado do ajuste disposto pelo Fuzzy, entende-se que apesar de tempo de subida seja menor, o tempo de acomodação e overshoot foram muito afetados, causando uma resposta com desempenho inferior.

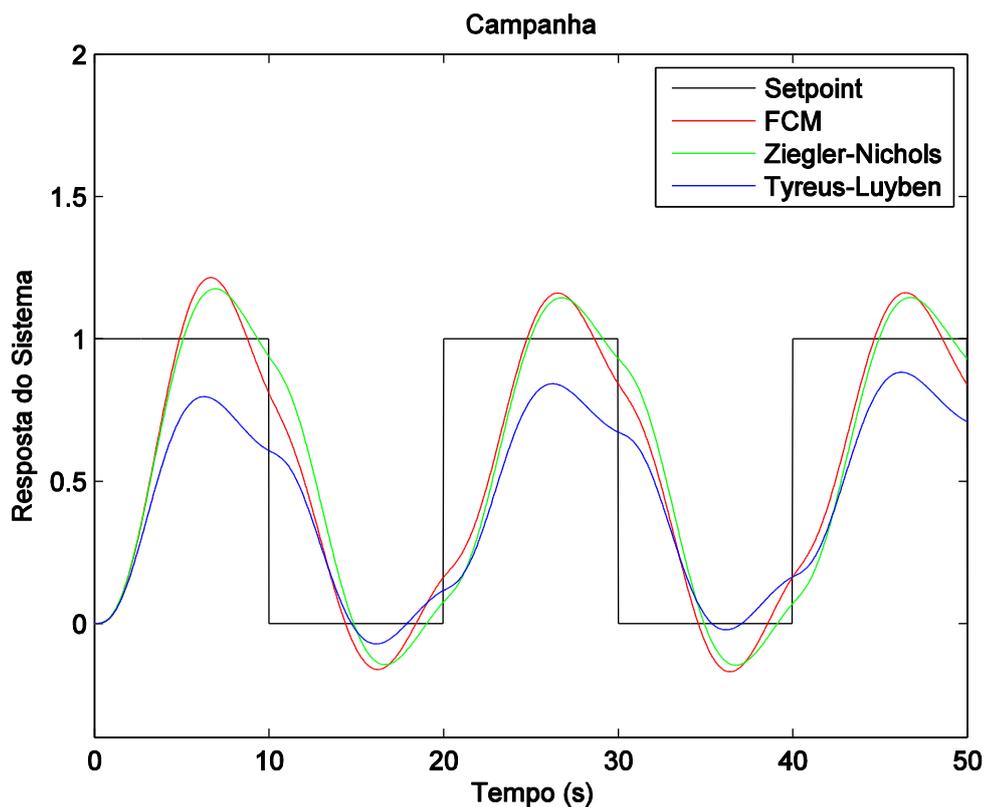


Figura 40 – Comparação dos ajustes na campanha para o sistema de quarta ordem utilizando FCM

Fonte: autoria própria.

Apesar da característica lenta da resposta do sistema de quarta ordem utilizado, os índices do *overshoot* e do tempo de acomodação impossibilitam um desempenho satisfatório para a campanha da Figura 40, uma vez que pode ser

observado que a variável manipulada apresenta considerável erro instantâneo por toda a campanha.

5.3.4 Sistema dinâmico de quarta ordem com zero

5.3.4.1 Sistema Fuzzy

O segundo sistema de quarta ordem utilizado (equação (17)) alcança oscilação sustentada com ganho proporcional $K = 1,9$, de acordo com a observação da função *rltool* do MatLab®. A oscilação sustentada (Figura 34) foi identificada pelo algoritmo com ganho crítico $K_{cr} = 1,925$ e período crítico $P_{cr} = 3,466$.

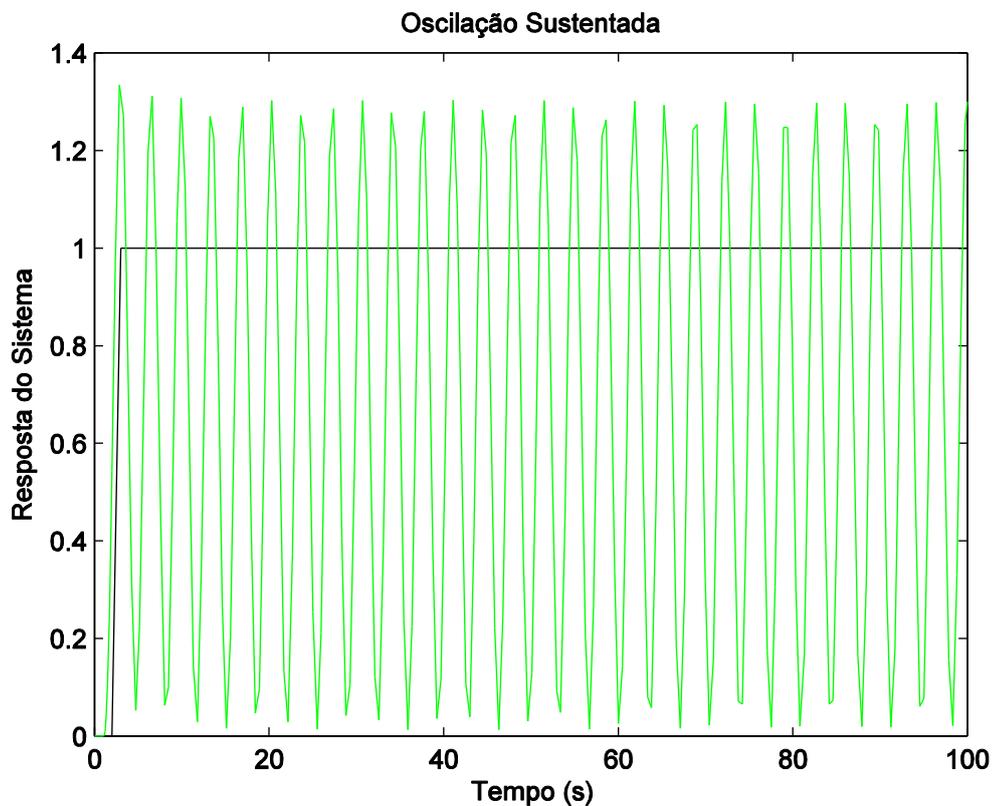


Figura 41 – Oscilação sustentada para o sistema de quarta ordem com zero
Fonte: autoria própria.

De acordo com a tabela proposta por Tyreus-Luyben, os valores dos parâmetros iniciais do ajuste foram $k_p = 0,875$, $k_d = 0,4814$ e $k_i = 0,1148$. Já pelo ajuste de Ziegler Nichols os valores encontrados foram $k_p = 1,155$, $k_d = 0,5004$ e $k_i = 0,6665$. A Figura 42 demonstra que mesmo o método Ziegler–Nichols tem dificuldade em fornecer uma resposta satisfatória. Com 4 iterações, o algoritmo determinou os parâmetros $k_p = 0,6862$, $k_d = 0,4664$ e $k_i = 0,4801$, aproximando a resposta ao método de Ziegler.

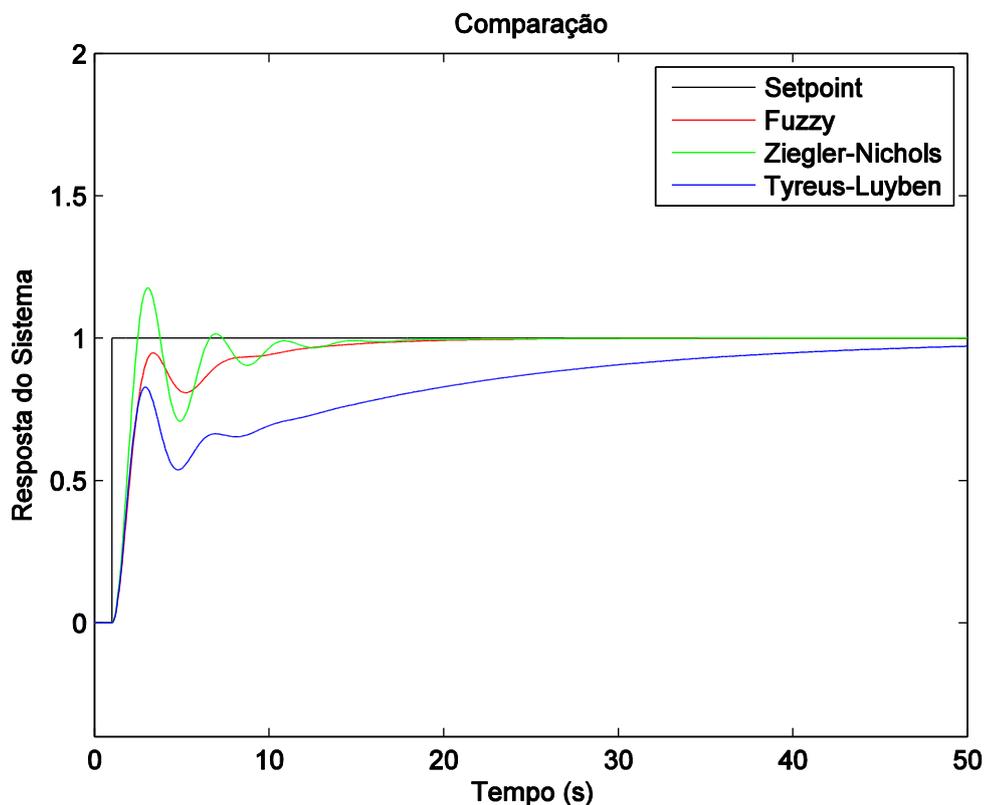


Figura 42 – Comparação dos ajustes para o sistema de quarta ordem (com zero) utilizando *Fuzzy*
Fonte: autoria própria.

Apesar do bom tempo de subida da resposta obtida por *fuzzy*, o período transitório apresenta leve oscilação e tempo de acomodação próximo ao apresentado pelo ajuste de Ziegler-Nichols. Analisando o erro IAE para a entrada degrau unitário, o ajuste adaptativo obteve aumento de 11,8% em relação ao ajuste de Ziegler e redução 72,2% em relação a Tyreus.

A Tabela 11 mostra os dados de qualidade de controle dos 3 métodos utilizados.

Tabela 11 – Resultados da simulação do sistema de quarta ordem com zero (Fuzzy)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação <i>Fuzzy</i>
Erro IAE	42,3763	170,2596	47,3961
Sobressinal	17,67%	0%	0%
Tempo de Subida	2,33 s	28,91 s	2,92 s
Tempo de acomod.	9,77 s	40,42 s	10,72 s

Fonte: autoria própria.

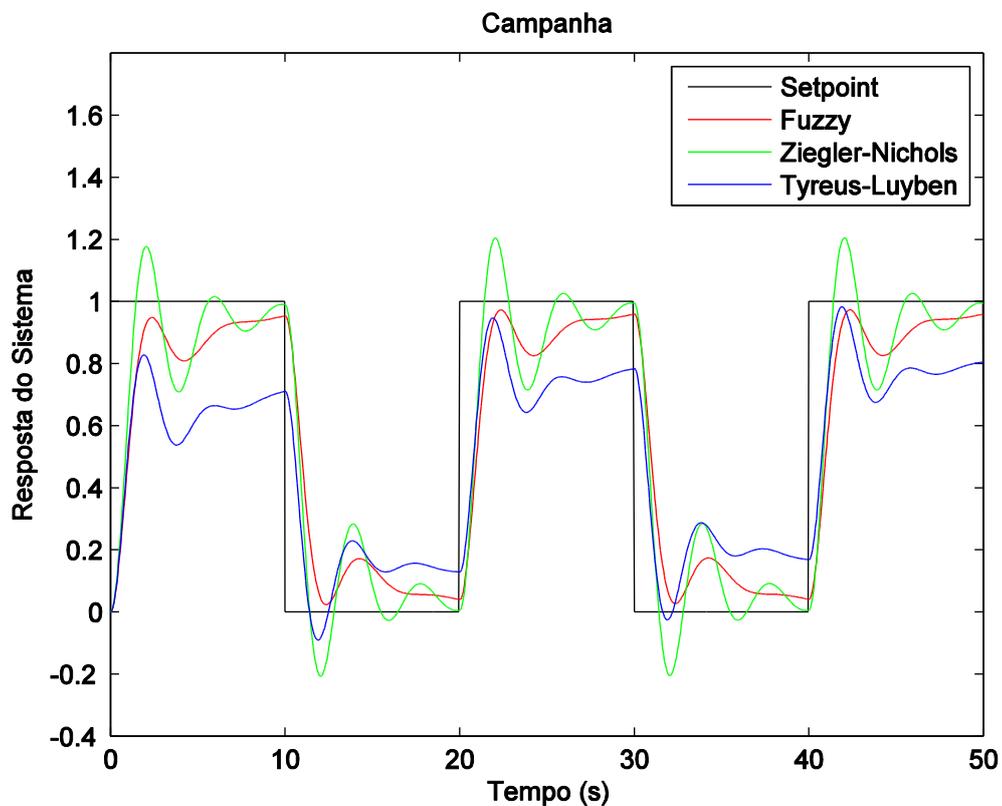


Figura 43 – Comparação dos ajustes na campanha para o sistema de quarta ordem (com zero) utilizando *Fuzzy*

Fonte: autoria própria.

Aplicando os ajustes a campanha (Figura 43) nota-se que o sistema *fuzzy*, apesar de possuir pior desempenho quando comparado com Ziegler-Nichols (que apresentou baixo erro devido à sua curva média de resposta estar próxima do *setpoint*), possui boa aproximação e dinâmica similar ao método citado.

5.3.4.2 Mapas Cognitivos Fuzzy

Com 9 iterações, o algoritmo determinou os parâmetros $k_p = 1,4143$, $k_d = 0,4135$ e $k_i = 0,4567$, levando a resposta a uma dinâmica similar ao ajuste de Ziegler-Nichols.

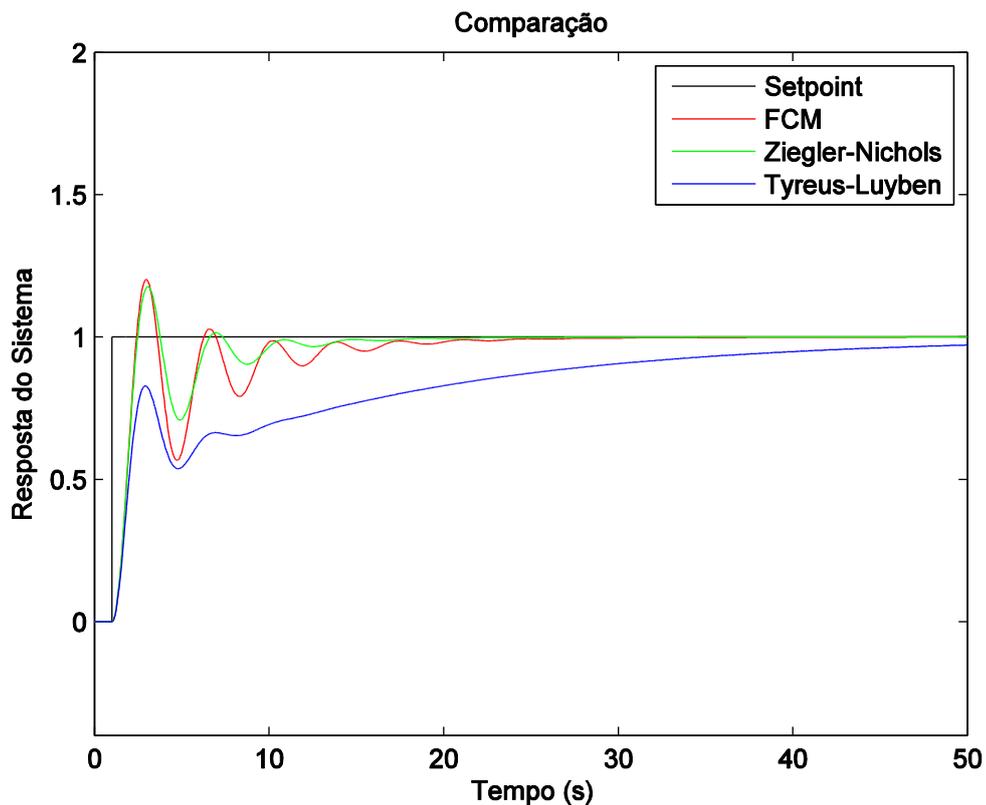


Figura 44 – Comparação dos ajustes para o sistema de quarta ordem (com zero) utilizando FCM

Fonte: autoria própria.

Devido a este ajuste apresentar oscilação levemente mais acentuada que o ajuste de Ziegler-Nichols (Figura 44), o resultado final apresentou um desempenho 31,3% inferior em relação ao erro acumulado. Porém, apesar do mediano valor de overshoot e tempo de acomodação afetado pela oscilação, o ajuste automático promoveu substancial melhora sobre o ajuste de Tyreus-Luyben, com redução do erro IAE em 67,3%.

A Tabela 12 mostra os dados de qualidade de controle dos 3 métodos utilizados.

Tabela 12 – Resultados da simulação do sistema de quarta ordem com zero (FCM)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação FCM
Erro IAE	42,3763	170,2596	55,66
Sobressinal	17,67%	0%	20,22%
Tempo de Subida	2,33 s	28,91 s	2,28 s
Tempo de acomod.	9,77 s	40,42 s	12,98 s

Fonte: autoria própria.

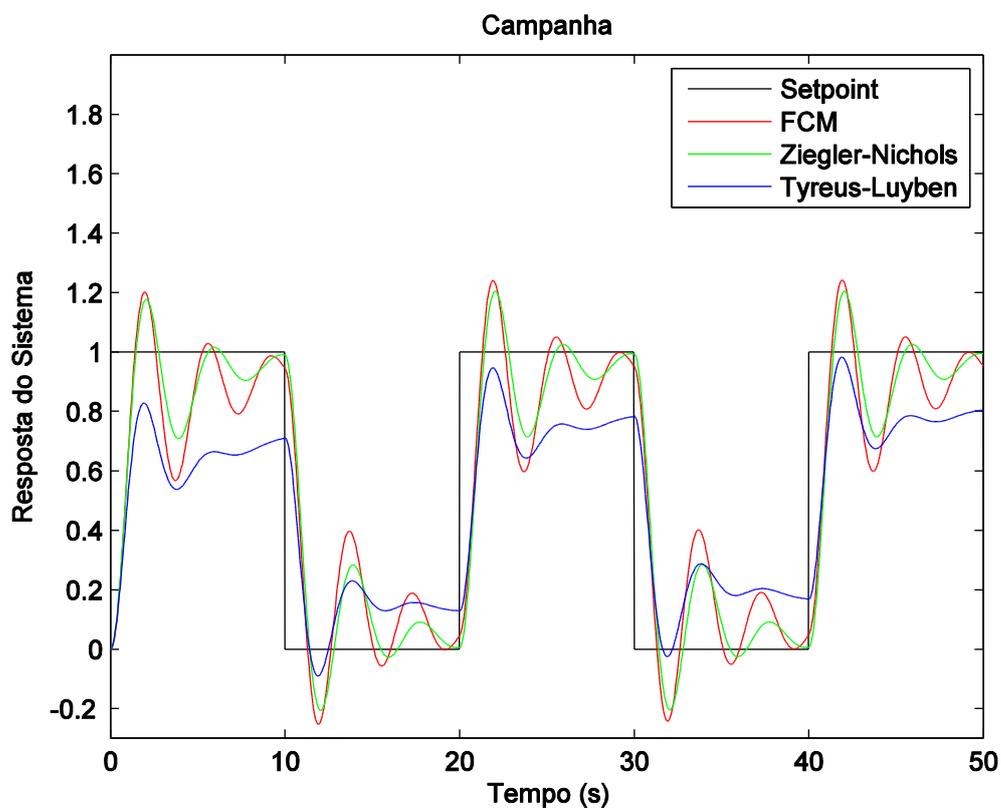


Figura 45 – Comparação dos ajustes na campanha para o sistema de quarta ordem (com zero) utilizando FCM

Fonte: autoria própria.

De acordo com a Figura 45, nota-se que, devido ao período pequeno do *setpoint* proposto, a resposta do sistema mantém-se em oscilação durante toda a campanha. Todavia, o melhor resultado sobre o ajuste de Tyreus-Luyben é claramente evidenciado pela diferença de tempo de acomodação.

5.3.5 Sistema dinâmico de quinta ordem

5.3.5.1 Sistema Fuzzy

O sistema de maior ordem utilizado no algoritmo de adaptação foi o descrito pela equação (18). A oscilação sustentada foi encontrada com ganho proporcional $K = 3,98$, de acordo com a observação da função *rltool* do MatLab. A oscilação sustentada (Figura 46) foi identificada pelo algoritmo com ganho crítico $K_{cr} = 3,275$ e período crítico $P_{cr} = 2,8048$.

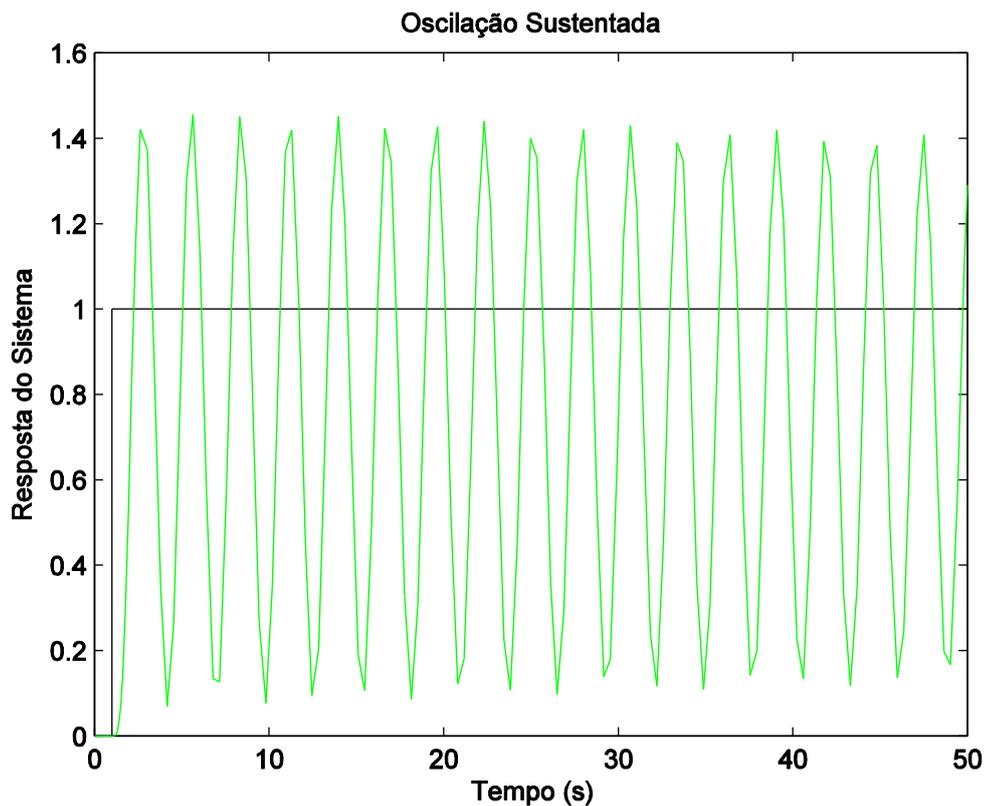


Figura 46 – Oscilação sustentada para o sistema de quinta ordem
Fonte: autoria própria.

Os valores dos parâmetros no ajuste inicial foram $k_p = 1,4886$, $k_d = 0,6628$ e $k_i = 0,2412$, adquiridos pela tabela de Tyreus-Luyben. Já pelo ajuste de Ziegler Nichols os valores encontrados foram $k_p = 1,965$, $k_d = 0,6889$ e $k_i = 1,4012$.

Aplicando a lógica *fuzzy* foram encontrados os parâmetros $k_p = 1,7629$, $k_d = 0,6673$ e $k_i = 1,0108$ após 3 iterações.

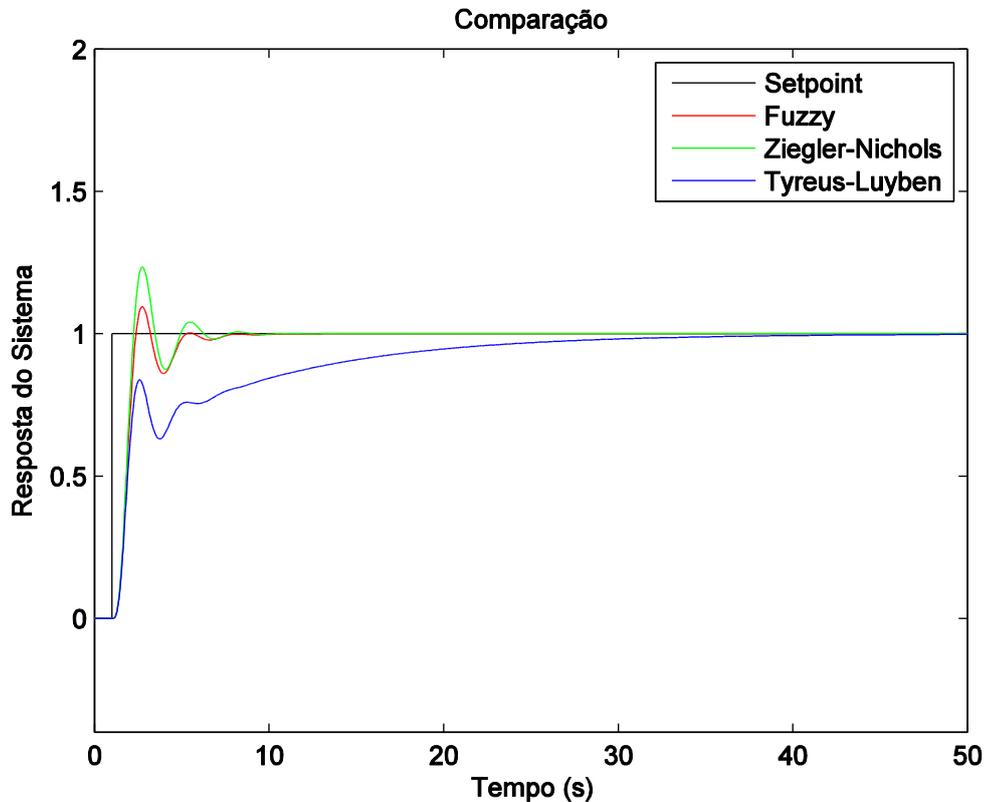


Figura 47 – Comparação das respostas dos ajustes para o sistema de quinta ordem utilizando *Fuzzy*

Fonte: autoria própria.

Pelos dados dispostos na tabela 13 e pela Figura 47 compreende-se que o resultado do ajuste pela ferramenta inteligente apresentou melhor resultado quando comparado ao ajuste de Ziegler-Nichols, devido a seu menor *overshoot* e tempos de subida e acomodação similares. Apesar de a resposta apresentar comportamento semelhante, houve melhora de 3,8% em relação ao erro IAE.

Tabela 13 – Resultados da simulação do sistema de quinta ordem (*Fuzzy*)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação <i>Fuzzy</i>
Erro IAE	31,6504	86,8097	30,4467
Sobressinal	23,48%	0%	9,54%
Tempo de Subida	2,16 s	14,2 s	2,25 s
Tempo de acomod.	4,69 s	20,67 s	4,74 s

Fonte: autoria própria.

Devido ao alto valor de tempo de acomodação do ajuste por Tyreus-Luyben, comparado aos outros métodos, o desempenho do ajuste *Fuzzy* se mostrou 64,9% melhor, em termos do erro acumulado.

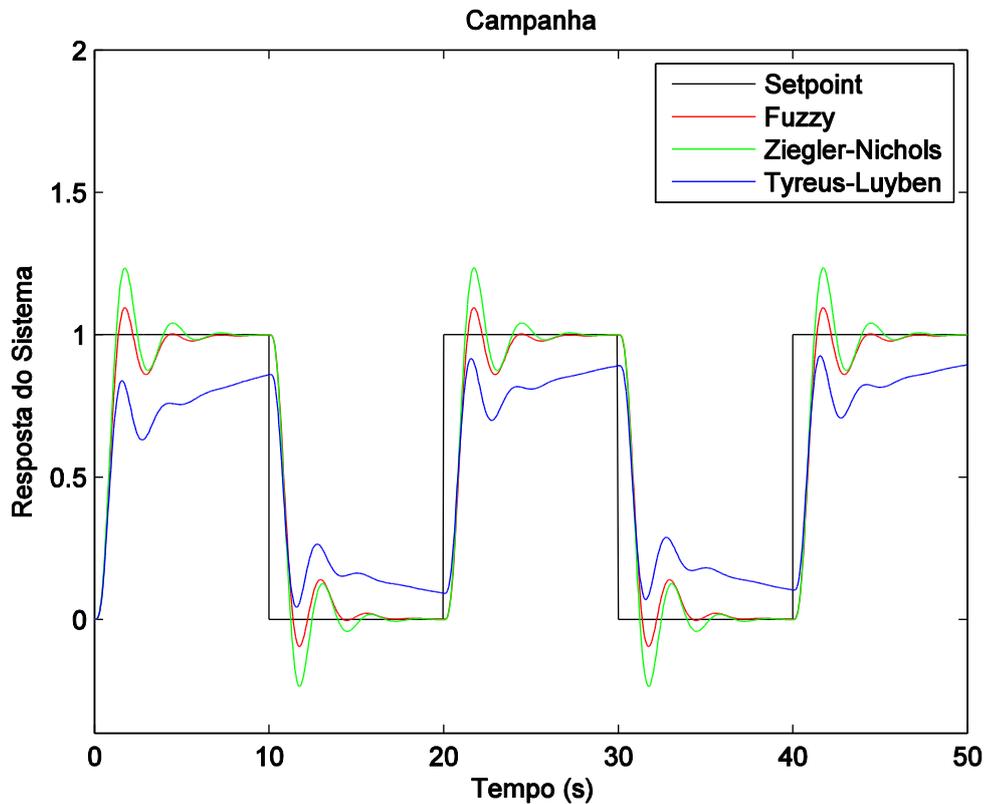


Figura 48 – Comparação dos ajustes na campanha para o sistema de quinta ordem utilizando *Fuzzy*
Fonte: autoria própria.

Como já previsto na rotina de ajuste, o resultado do ajuste por *Fuzzy* tornou a resposta satisfatória (Figura 48), partindo do ajuste inicial de Tyreus-Luyben que não apresentou acomodação durante a campanha.

5.3.5.2 Mapas Cognitivos Fuzzy

Após a aplicação de 10 iterações, o ajuste automático por FCM determinou os parâmetros: $k_p = 2,4957$, $k_d = 0,9922$ e $k_i = 0,8814$.

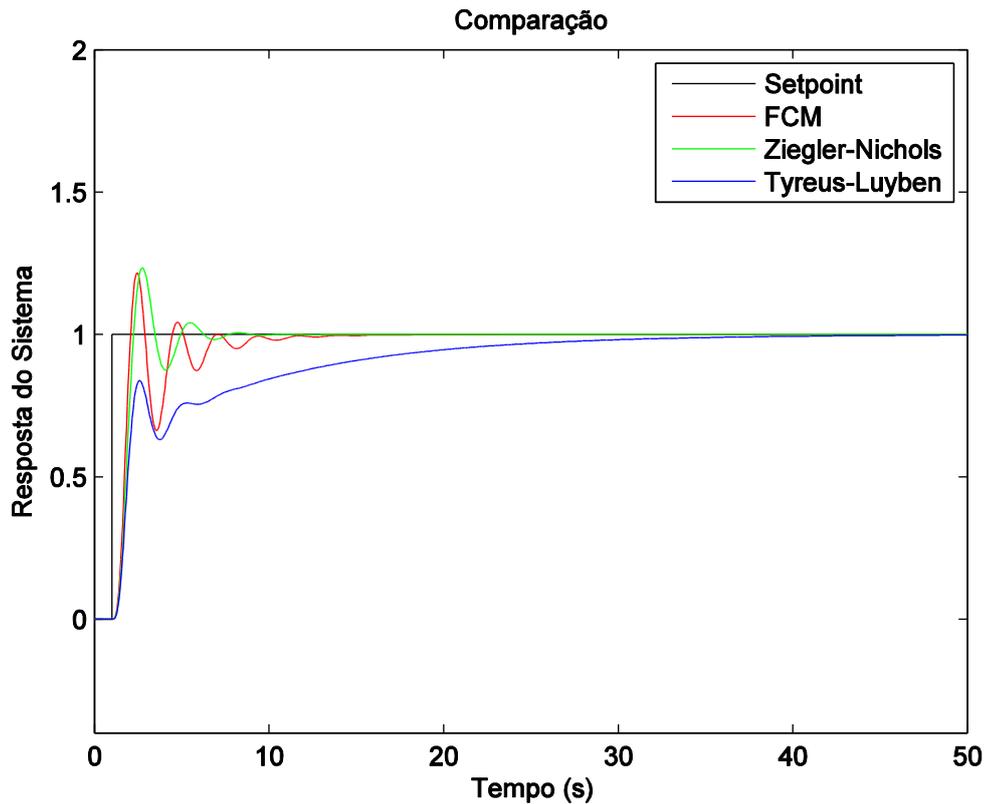


Figura 49 – Comparação das respostas dos ajustes para o sistema de quinta ordem utilizando FCM

Fonte: autoria própria.

De acordo com a Figura 49, observa-se que o ajuste realizado pelo Mapa Cognitivo *Fuzzy* apresentou tempo de acomodação próximo ao valor resultante do ajuste por Ziegler-Nichols, ainda com melhor tempo de subida. Este resultado, porém, foi influenciado negativamente pela maior oscilação, causa resultado 14,4% inferior, quando analisado o erro IAE. Por outro lado, comparado ao ajuste de Tyreus-Luyben, houve significativa melhora em relação ao erro acumulado, chegando a 58,3%. A Tabela 14 reúne os resultados dos 3 métodos utilizados.

Tabela 14 – Resultados da simulação do sistema de quinta ordem (FCM)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação FCM
Erro IAE	31,6504	86,8097	36,2148
Sobressinal	23,48%	0%	21,67%
Tempo de Subida	2,16 s	14,2 s	2,03 s
Tempo de acomod.	4,69 s	20,67 s	6,5 s

Fonte: autoria própria.

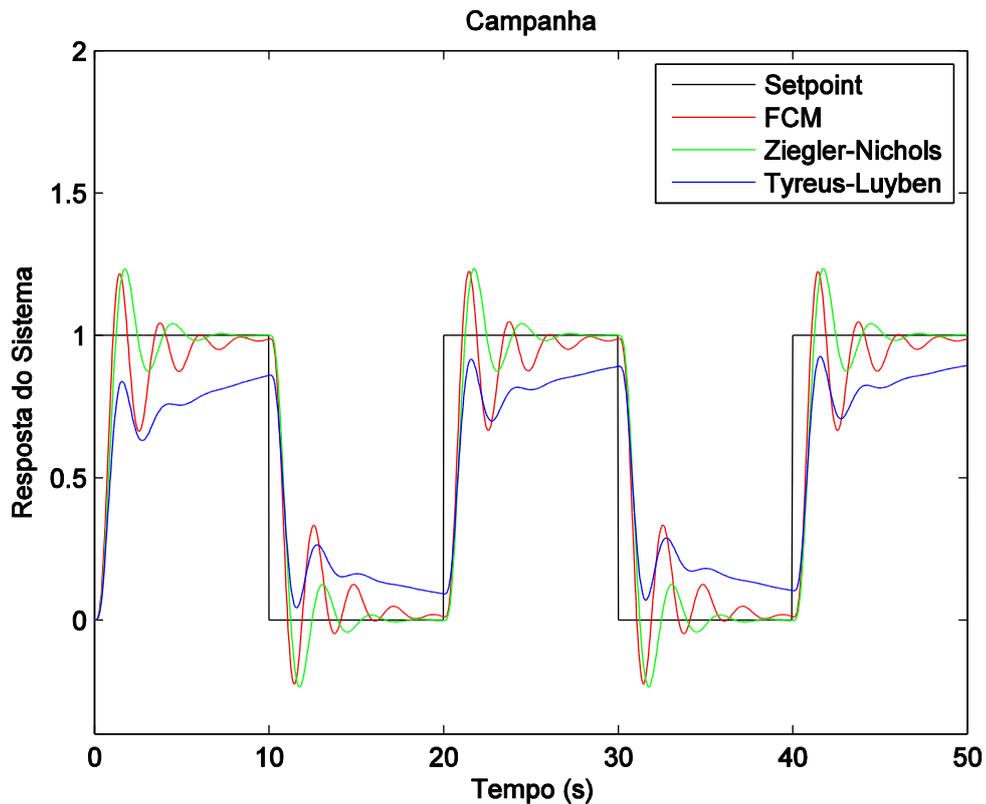


Figura 50 – Comparação dos ajustes na campanha para o sistema de quinta ordem utilizando FCM

Fonte: autoria própria.

Em análise da Figura 50 juntamente aos dados da Tabela 14, observa-se que a resposta permanece próxima ao *setpoint* durante toda a campanha, apesar de sua oscilação constante. Este resultado se deve ao baixo tempo de subida combinado ao tempo de acomodação abaixo da largura de pulso da entrada (10s).

5.3.6 Sistema dinâmico de quinta ordem com zero

5.3.6.1 Sistema Fuzzy

O último sistema dinâmico utilizado neste trabalho, descrito pela equação (19), é de quinta ordem e possui um zero em $s = -2$. A oscilação sustentada (Figura

51) foi identificada pelo algoritmo com ganho crítico $K_{cr} = 6,3$ e período crítico $P_{cr} = 5,1982$.

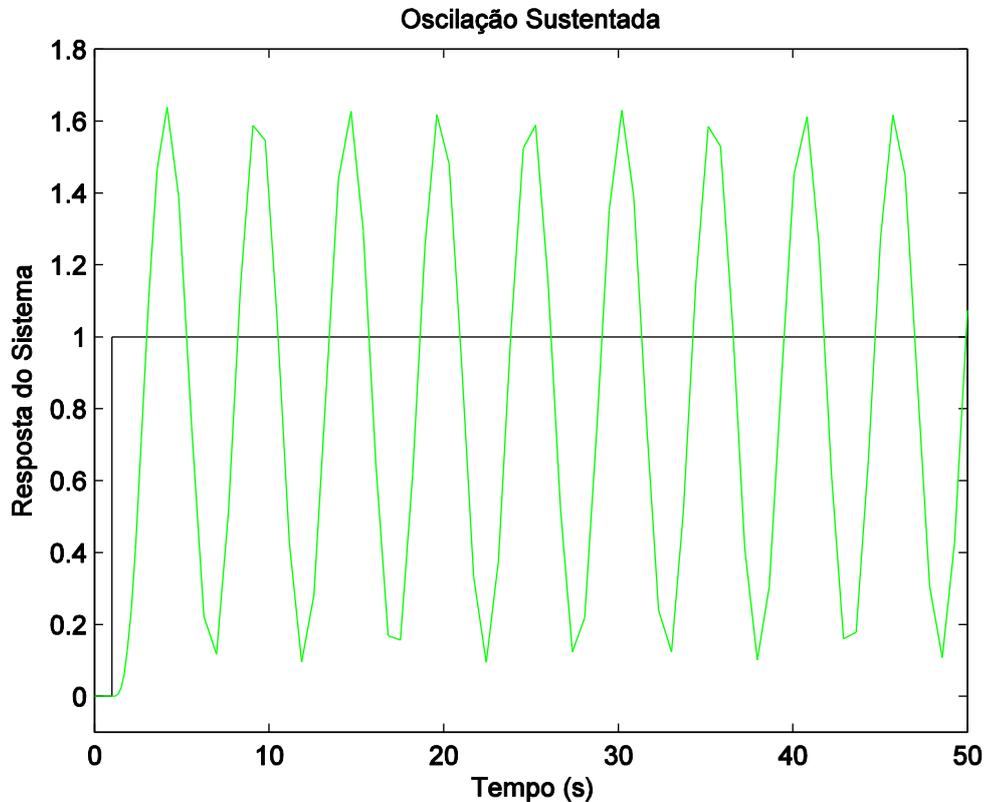


Figura 51 – Oscilação sustentada para o sistema de quinta ordem com zero
Fonte: autoria própria.

De acordo com a tabela proposta por Tyreus-Luyben, os valores dos parâmetros iniciais do ajuste foram $k_p = 2,8693$, $k_d = 2,3628$ e $k_i = 0,2504$. Já pelo ajuste de Ziegler Nichols os valores encontrados foram $k_p = 3,78$, $k_d = 2,4562$ e $k_i = 1,4543$. A Figura 52 demonstra claramente uma melhor resposta utilizando os parâmetros adquiridos através do ajuste automático em relação aos outros métodos utilizados..

Após 2 iterações foram encontrados os parâmetros $k_p = 3,5213$, $k_d = 3,3554$ e $k_i = 1,3549$, que levaram a resposta do sistema a apresentar um desempenho superior aos demais.

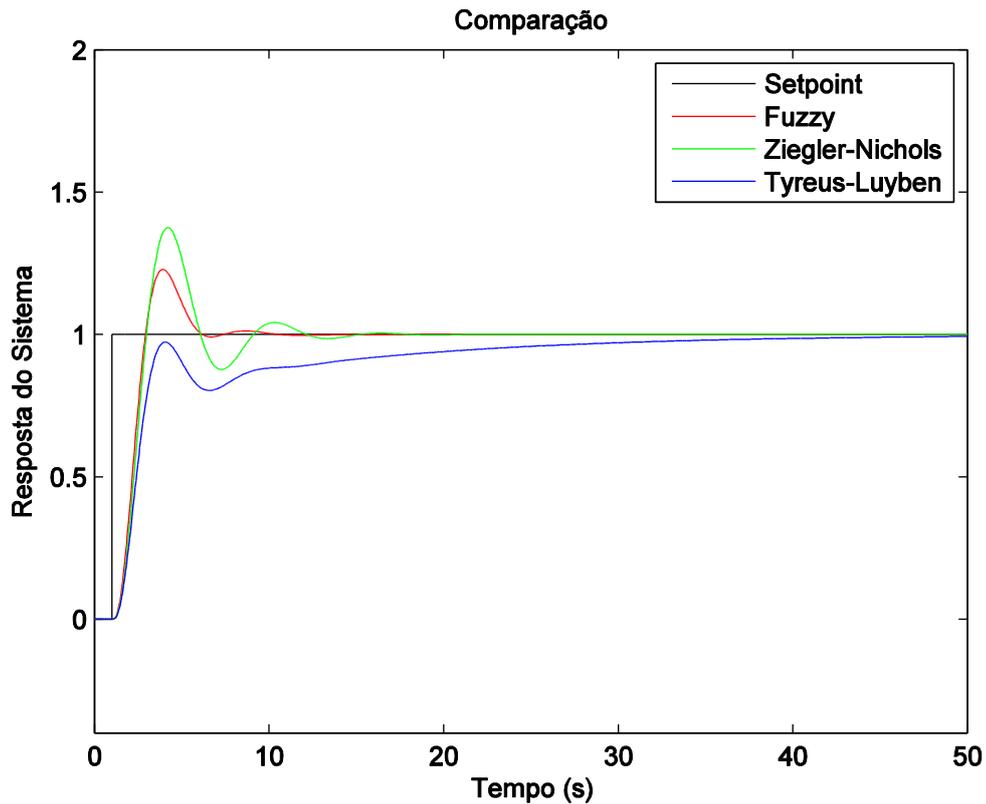


Figura 52 – Comparação das respostas dos ajustes para o sistema de quinta ordem (com zero) utilizando *Fuzzy*
Fonte: autoria própria.

Observando a Figura 52 nota-se que o ajuste realizado pela lógica *Fuzzy* apresentou melhora sobre ambas as respostas dos ajustes propostos pelas tabelas mencionadas. Analisando o erro IAE para a entrada degrau unitário, o ajuste adaptativo obteve redução de 37,5% em relação ao ajuste de Ziegler e 52,6% em relação a Tyreus.

A Tabela 15 mostra os dados de qualidade de controle dos 3 métodos utilizados.

Tabela 15 – Resultados da simulação do sistema de quinta ordem com zero (*Fuzzy*)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação <i>Fuzzy</i>
Erro IAE	61,6055	81,332	38,5226
Sobressinal	37,6%	0%	22,84%
Tempo de Subida	2,83 s	3,4 s	2,76 s
Tempo de acomod.	8,52 s	22,52 s	5,51 s

Fonte: autoria própria.

Nota-se que, para este sistema, a lógica *Fuzzy* alcançou um ajuste que proporcionou uma resposta mais rápida que as anteriores, porém com considerável *overshoot*. O grande diferencial do ajuste inteligente para este sistema foi o bom resultado relacionado ao tempo de acomodação. A resposta entra em regime 3 segundos mais rápido que a resposta do ajuste por Ziegler-Nichols, caracterizando uma melhora de 35%.

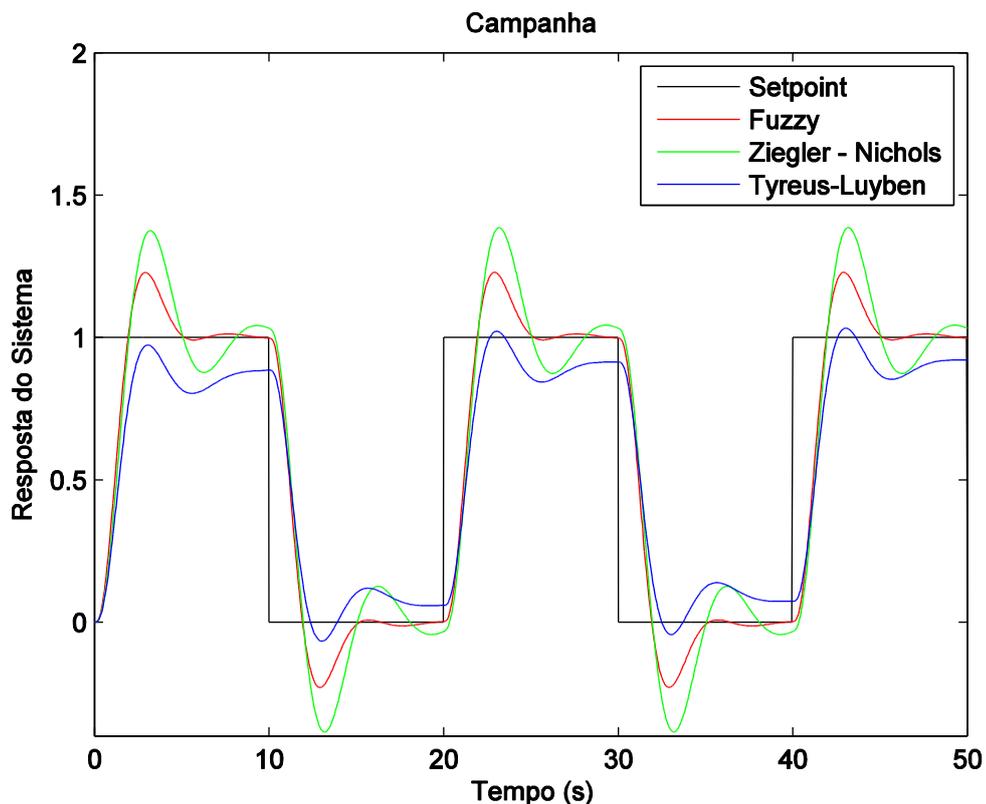


Figura 53 – Comparação dos ajustes na campanha para o sistema de quinta ordem (com zero) utilizando *Fuzzy*

Fonte: autoria própria.

Apesar do considerável *overshoot*, o resultado se manteve satisfatório devido ao bom tempo de acomodação. Nota-se que o ajuste por *Fuzzy* é o único que alcança o regime permanente para a campanha proposta na Figura 53.

A resposta com maior acomodação afeta diretamente o resultado em relação ao erro acumulado na campanha, como pode ser observado em comparação aos ajustes de Ziegler-Nichols e Tyreus-Luyben.

5.3.6.2 Mapas Cognitivos Fuzzy

Assim como no ajuste por Sistema Fuzzy, o ajuste por FCM parte dos valores adquiridos pela tabela de Tyreus-Luyben e, para o sistema de quinta ordem, após 9 iterações determina os parâmetros $k_p = 4,13$, $k_d = 2,7556$ e $k_i = 0,8179$ para o controlador PID.

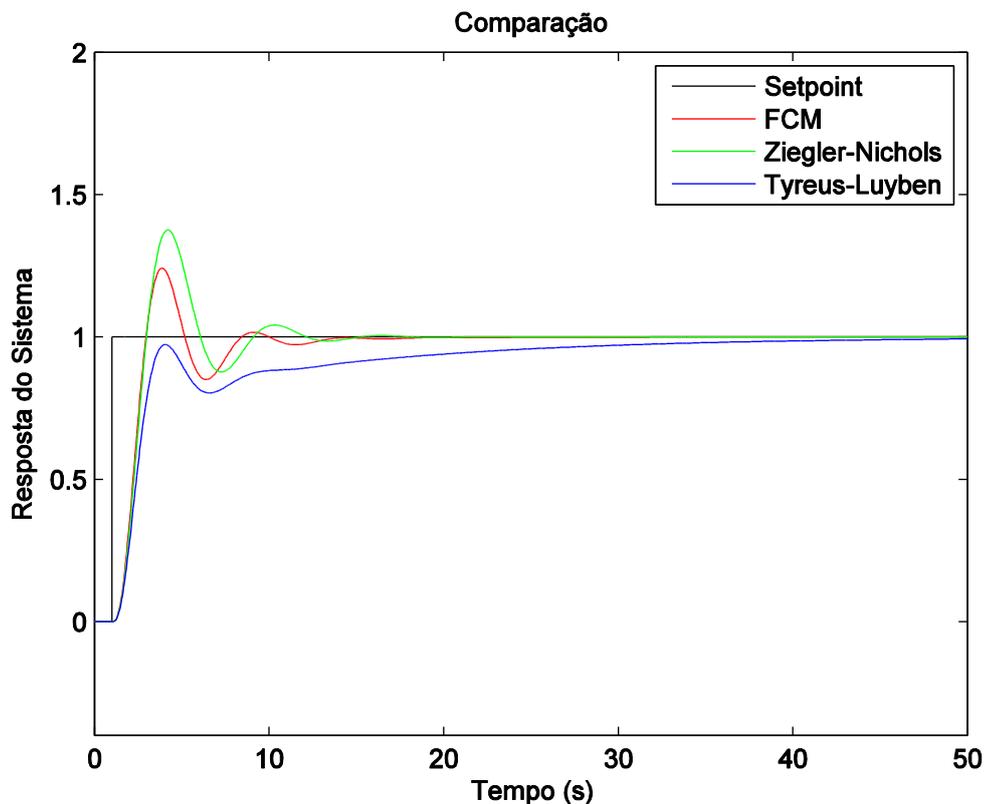


Figura 54 – Comparação das respostas dos ajustes para o sistema de quinta ordem (com zero) utilizando FCM
Fonte: autoria própria.

O ajuste realizado pelo FCM resultou em um aumento de desempenho da ordem de 44,9% em relação ao ajuste por Tyreus-Luyben. Em comparação ao ajuste de Ziegler-Nichols, nota-se que a resposta apresentou comportamento similar, entretanto com menor *overshoot* e acomodação 0,71s mais rápida, o que diminuiu o erro acumulativo em 27,2%.

A Tabela 16 mostra os dados de qualidade de controle dos 3 métodos utilizados. Importante mencionar que, para este sistema, o ajuste automático por FCM

foi capaz de manter o tempo subida e diminuir o tempo de acomodação, o que contribui para uma resposta mais comportada e com menor erro acumulado.

Tabela 16 – Resultados da simulação do sistema de quinta ordem com zero (FCM)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação FCM
Erro IAE	61,6055	81,332	44,8242
Sobressinal	37,6%	0%	24,16%
Tempo de Subida	2,83 s	3,4 s	2,83 s
Tempo de acomod.	8,52 s	22,52 s	7,81 s

Fonte: autoria própria.

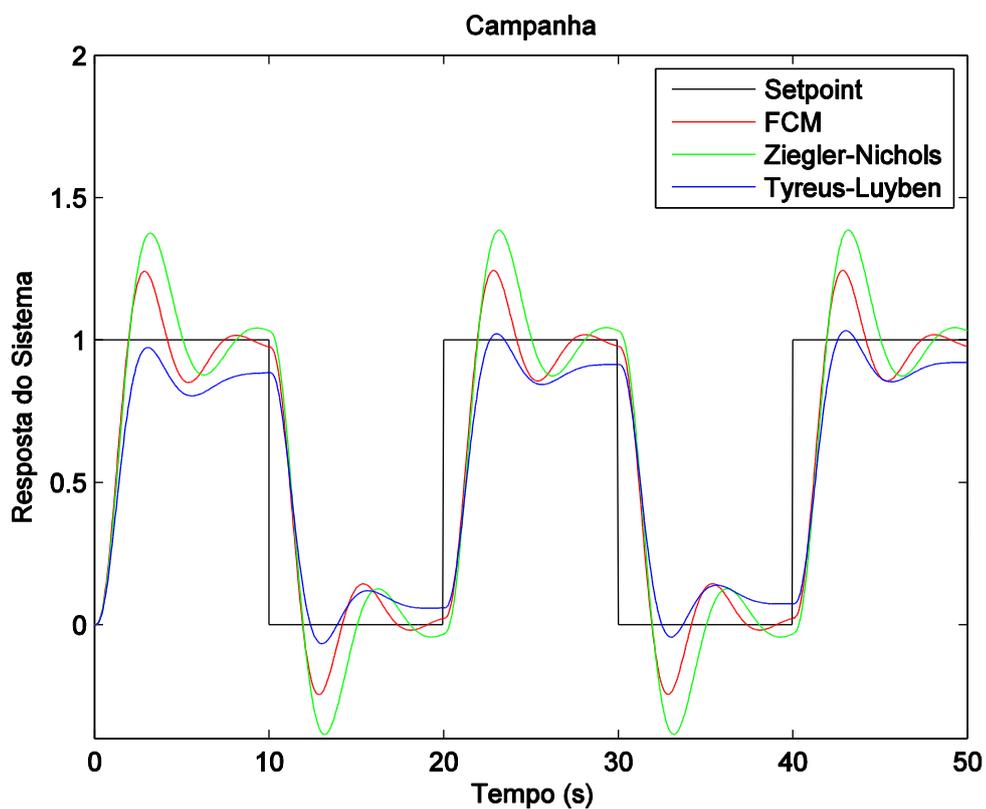


Figura 55 – Comparação dos ajustes na campanha para o sistema de quinta ordem (com zero) utilizando FCM

Fonte: autoria própria.

O resultado superior é confirmado pela resposta apresentada na Figura 55, em que se identifica melhor acomodação e conseqüente menor erro acumulado. Em relação ao ajuste de Tyreus, nota-se que o FCM possibilitou que o resultado fosse considerado satisfatório.

5.3.7 Processo de fermentação alcoólica

5.3.7.1 Sistema Fuzzy

Além dos sistemas genéricos, este trabalho apresenta a aplicação do PID auto ajustável a um processo de fermentação alcoólica, descrita na seção 4.2. Este é um sistema de quarta ordem modelado por equações diferenciais e possui as características necessárias para a utilização do método proposto. A oscilação sustentada (Figura 56) foi identificada pelo algoritmo com ganho crítico $K_{cr} = 2$ e período crítico $P_{cr} = 14h$.

Nota-se que, diferente dos sistemas apresentados anteriormente, o fermentador alcoólico possui período medido em horas, devido à sua dinâmica lenta, que modela as reações químicas que ocorrem dentro do tanque de fermentação.

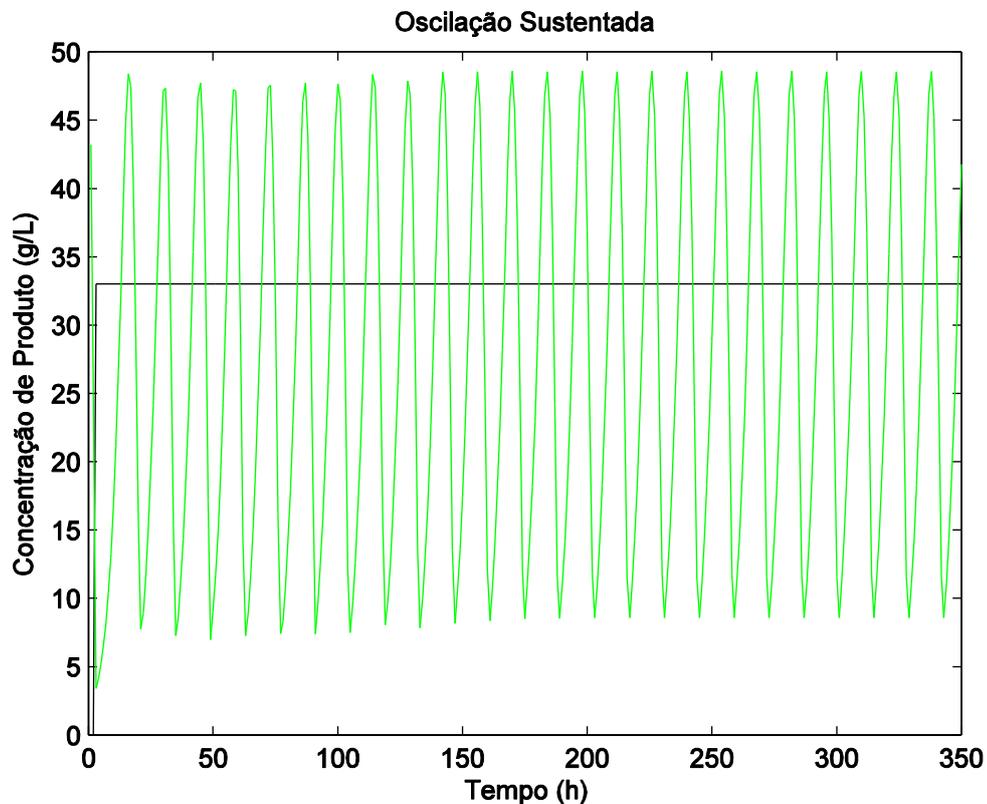


Figura 56 – Oscilação sustentada para o fermentador alcoólico
Fonte: autoria própria.

De acordo com a tabela proposta por Tyreus-Luyben, os valores dos parâmetros iniciais do ajuste foram $k_p = 0,9091$, $k_d = 2,0202$ e $k_i = 0,0295$. Já pelo ajuste de Ziegler Nichols os valores encontrados foram $k_p = 1,2$, $k_d = 2,1$ e $k_i = 0,1714$.

Após 2 iterações foram encontrados os parâmetros pelo ajuste automático utilizando *Fuzzy*: $k_p = 0,4561$, $k_d = 2,6249$ e $k_i = 0,0566$. Este ajuste resultou em uma resposta com menor pico sobressinal e tempo de acomodação significativamente inferior aos outros dois métodos utilizados.

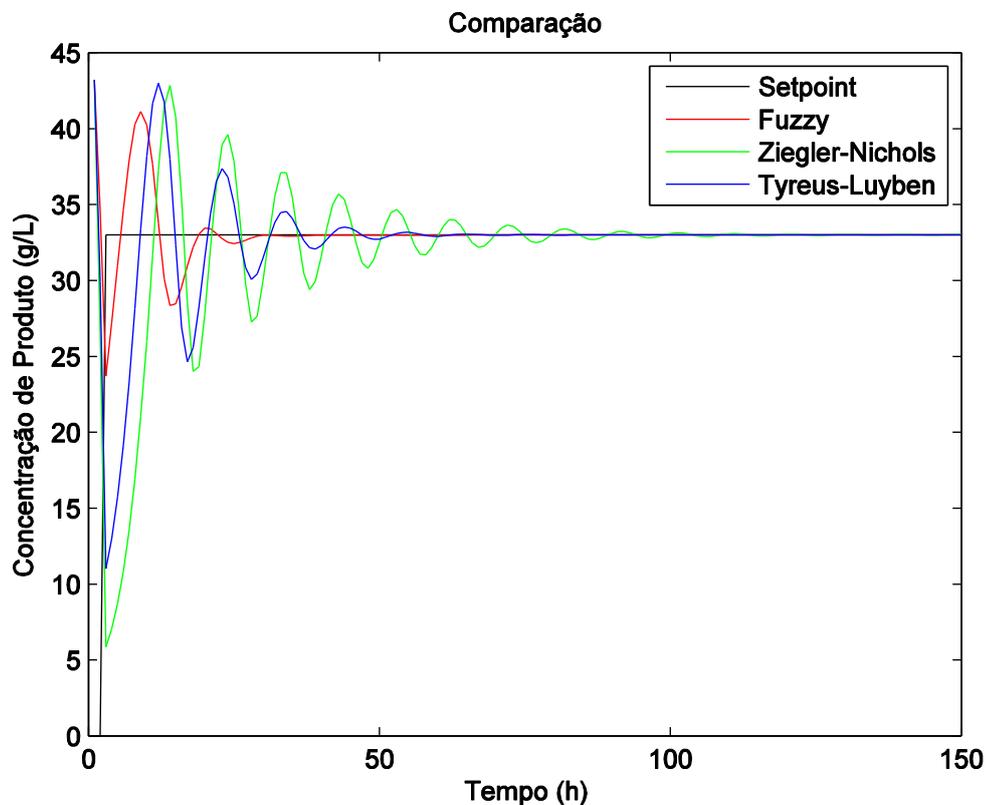


Figura 57 – Comparação da resposta por *Fuzzy* com outros métodos aplicados ao fermentador

Fonte: autoria própria.

De acordo com a Figura 57, o ajuste realizado pela lógica *Fuzzy* apresentou um melhor desempenho sobre os ajustes propostos pelas tabelas mencionadas. O fermentador é ajustado para o setpoint com valor 33, por ser o menor valor da campanha proposta por Mendonça (2011). Neste ponto de operação, analisando o erro IAE, observa-se uma melhora de 60,5% em relação ao ajuste de Ziegler e 34,3% em relação a Tyreus. Observa-se também que este ajuste foi capaz de reduzir consideravelmente as oscilações da resposta em período transitório.

Tabela 17 – Resultados da simulação do processo de fermentação alcoólica (Fuzzy)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação <i>Fuzzy</i>
Erro IAE	386,0325	231,8972	152,4578
Sobressinal	29,78%	30,3%	24,63%
Tempo de Subida	11 h	9 h	5 h
Tempo de acomod.	54 h	30 h	18 h

Fonte: autoria própria.

Nota-se ainda que, para este sistema, a lógica *Fuzzy* alcançou um ajuste que proporcionou uma resposta mais rápida que as anteriores. Compreende-se através da tabela 17 que o ajuste automático foi capaz de determinar os parâmetros que levaram a resposta do sistema a apresentar um menor *overshoot*, combinado a um tempo de subida e tempo de acomodação menores.

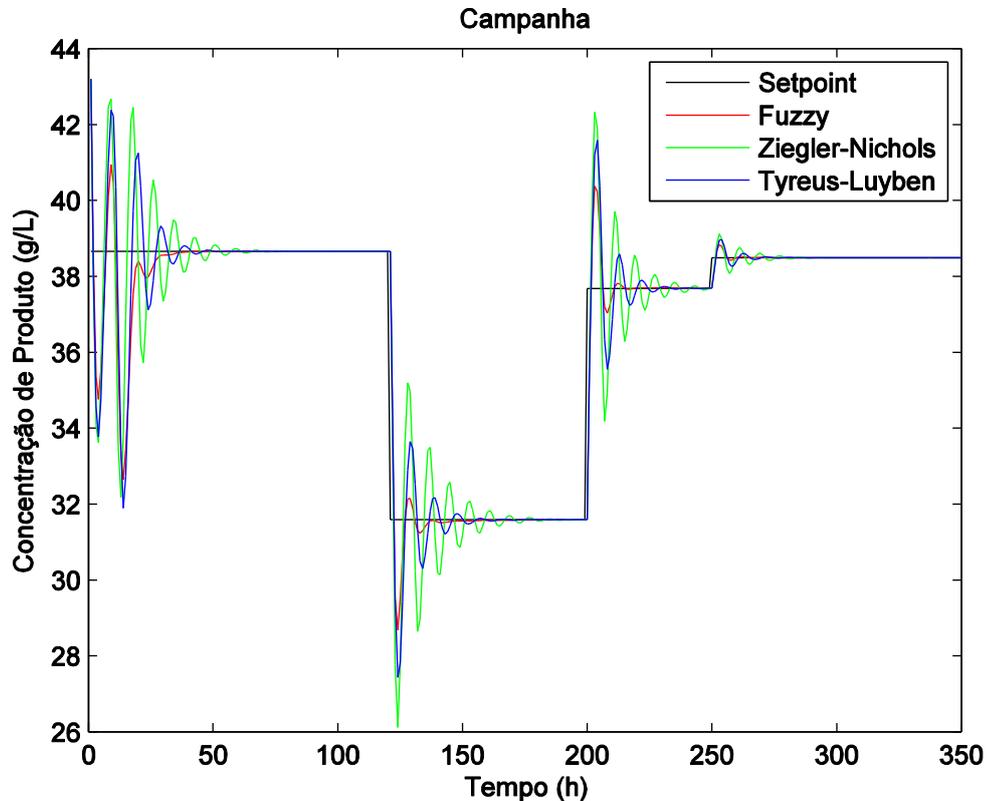


Figura 58 – Comparação da campanha de produção utilizando *Fuzzy*
 Fonte: autoria própria.

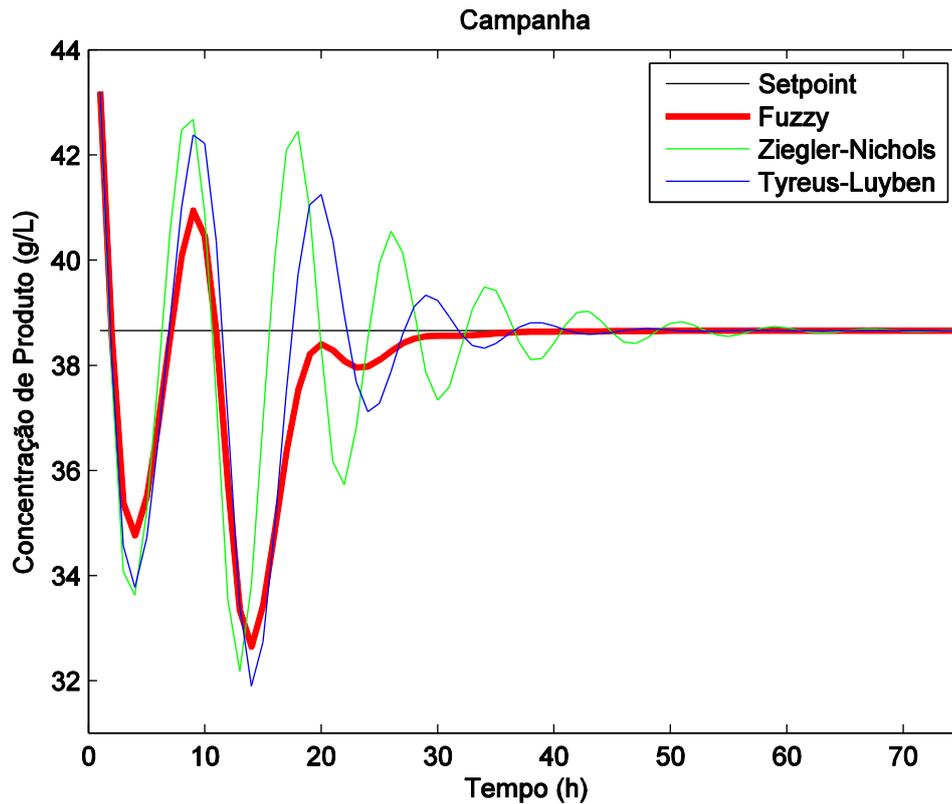


Figura 59 – Respostas no início da campanha de produção (*Fuzzy*)
 Fonte: autoria própria.

Aplicando os ajustes na campanha proposta, observa-se um adiantamento na resposta dos ajustes de Ziegler-Nichols e Tyreus-Luyben, que está ligada ao diferente ponto de operação, fazendo com que os tempos de subida e de acomodação diminuam (Figura 58). Mesmo com esta variação nas respostas dos dois ajustes, a resposta do sistema ajustado por *Fuzzy* manteve melhor resultado (Figura 59).

5.3.7.2 Mapas Cognitivos Fuzzy

A rotina de adaptação utilizando os Mapas Cognitivos *Fuzzy* resultou nos parâmetros $k_p = 0,5954$, $k_d = 2,7932$ e $k_i = 0,0368$ após um conjunto de 3 iterações realizadas.

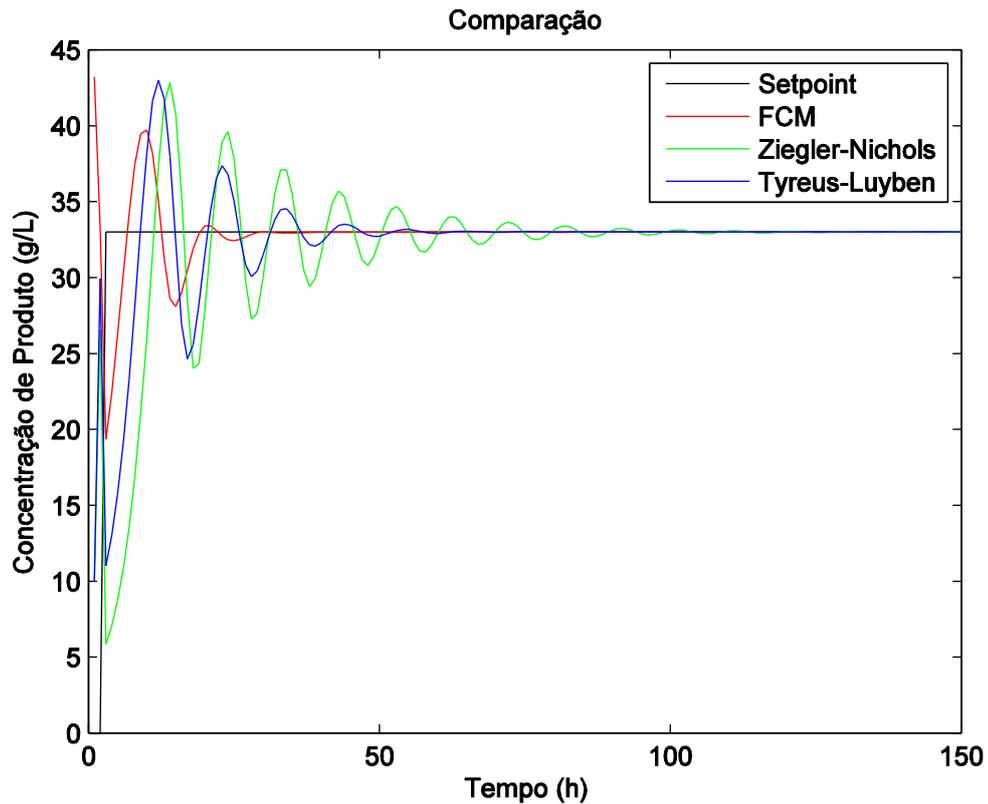


Figura 60 – Comparação da resposta por FCM com outros métodos aplicados ao fermentador
Fonte: autoria própria.

Observando a Figura 60 nota-se que o ajuste realizado pelo FCM apresentou melhora sobre ambas as respostas dos ajustes propostos pelos métodos aplicados. Analisando o erro IAE, o ajuste adaptativo obteve redução de 58,8,8% em relação ao ajuste de Ziegler e 31,3% em relação a Tyreus.

A Tabela 18 mostra os dados de qualidade de controle dos 3 métodos utilizados.

Tabela 18 – Resultados da simulação do processo de fermentação alcoólica (FCM)

	Ziegler – Nichols	Tyreus – Luyben	Adaptação FCM
Erro IAE	386,0325	231,8972	159,2202
Sobressinal	29,78%	30,31%	20,36%
Tempo de Subida	11 h	9 h	6 h
Tempo de acomod.	54 h	30 h	18 h

Fonte: autoria própria.

Entende-se pela Tabela 18 e pelas Figuras 61 e 62 que o comportamento e os valores resultantes do ajuste por FCM se mostraram similares ao ajuste por *Fuzzy*.

Ainda, observa-se que o ajuste adaptativo de maneira geral possibilita uma acomodação 12h mais rápida, comparada com melhor resultado dos métodos dispostos pela literatura, contribuindo para o desempenho final do controle.

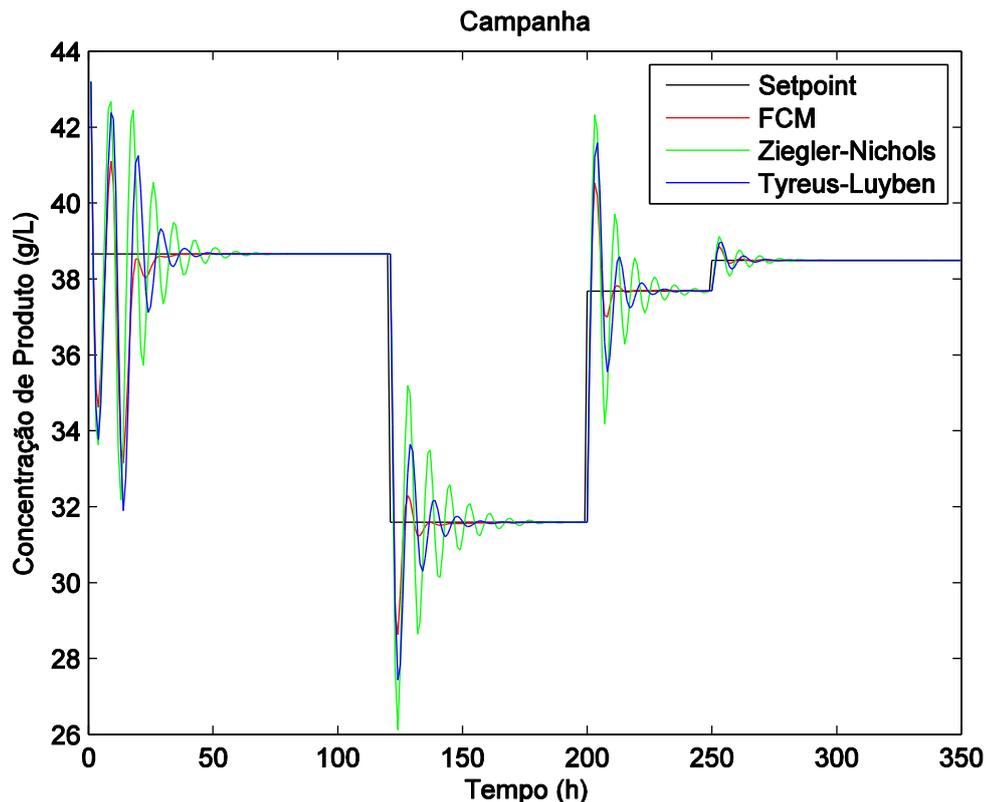


Figura 61 – Comparação da campanha de produção utilizando FCM
 Fonte: autoria própria.

Através da Figura 62 pode-se notar a substancial redução do *overshoot* da resposta (cerca de 10%), o que garante que a campanha inicie com concentração de produto mais próxima do valor demandado, diminuindo as perdas no processo.

De acordo com os resultados apresentados, os ajustes automáticos realizados pela tomada de decisão do Sistema *Fuzzy* e dos Mapas Cognitivos *Fuzzy* trouxeram incremento na qualidade da resposta em todos os aspectos analisados, mostrando a capacidade destes sistemas em exportar o conhecimento inserido na ferramenta para uma aplicação, resultando em um bom desempenho.

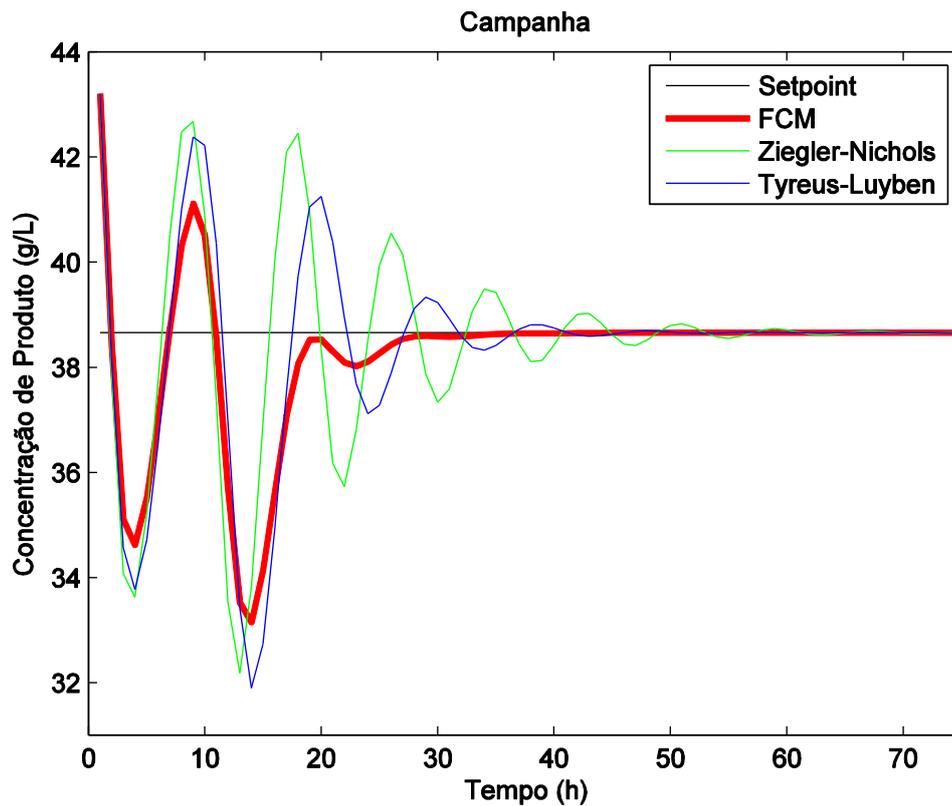


Figura 62 – Respostas no início da campanha de produção (FCM)
Fonte: autoria própria.

A seção a seguir reúne os dados do ajuste por sistemas inteligentes, com foco na comparação de seus resultados.

5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Observando as simulações para ambas as ferramentas inteligentes em todos os sistemas dinâmicos propostos nota-se que há alteração dos parâmetros de acordo com as características do sistema em simulação, mostrando que há tomada de decisão e ação dos sistemas inteligentes. Em comparação com os ajustes de Tyreus-Luyben, observa-se uma resposta com melhores resultados em 100% das simulações. Em alguns casos, ainda melhor que o ajuste proposto por Ziegler e Nichols.

De modo geral, as respostas do ajuste por Sistema *Fuzzy* apresentaram uma dinâmica mais comportada, com melhor tempo de acomodação. Já as respostas pelo ajuste utilizando os Mapas Cognitivos *Fuzzy* mostraram maior velocidade, com tempo de subida inferior, entretanto não apresenta amortecimento tão eficiente causando um maior *overshoot* em todas as campanhas. Em média, o erro IAE evidenciou uma melhora de 18% na resposta dos ajustes realizados pelo Sistema *Fuzzy* proposto sobre os ajustes utilizando os Mapas Cognitivos *Fuzzy*.

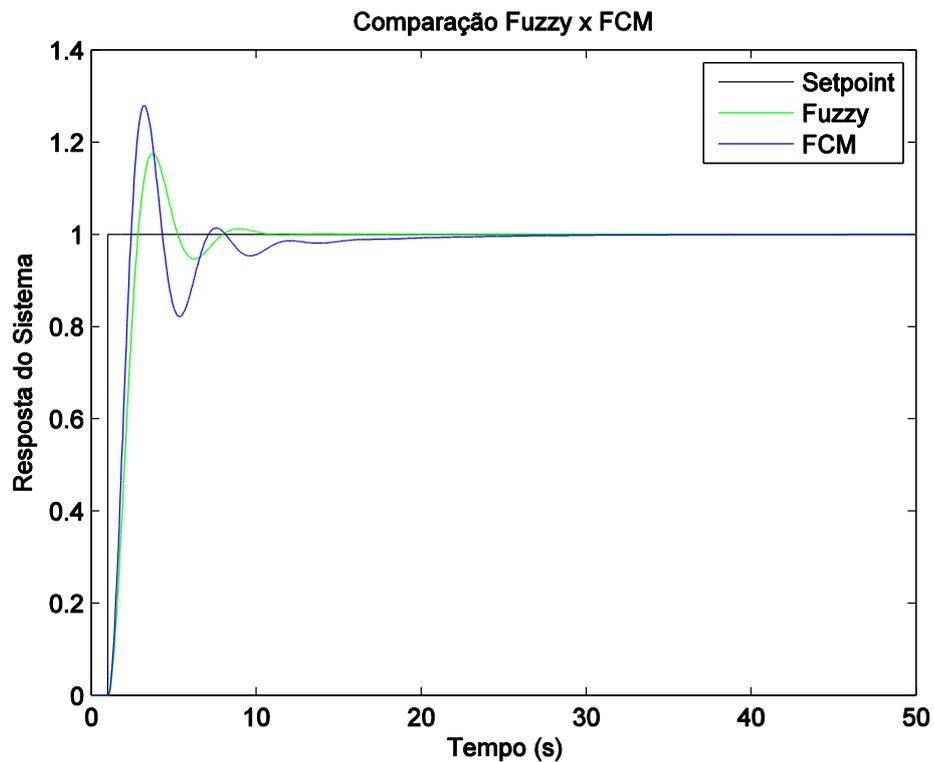


Figura 63 – Comparação do sistema de terceira ordem
Fonte: autoria própria.

A Figura 63 demonstra o comparativo dos ajustes utilizando *Fuzzy* e FCM para o sistema de terceira ordem da equação (14). Em ambas se observam dinâmicas semelhantes, porém com *Fuzzy* apresentando melhor amortecimento. Para a campanha de ajuste, o controlador *Fuzzy* apresentou melhora de 16,13% em relação ao ajuste utilizando FCM, quando observado os valores do erro acumulativo.

Analisando a resposta da simulação da equação (15), a melhora foi ainda mais acentuada, chegando a 22,4%. Nota-se ainda que para esta equação, o FCM apresentou um tempo de subida 31,5% mais baixo, entretanto, devido a velocidade

da resposta, há maior oscilação no período transitório levando a um resultado 36,8% mais alto em relação ao *Fuzzy* (Figura 64).

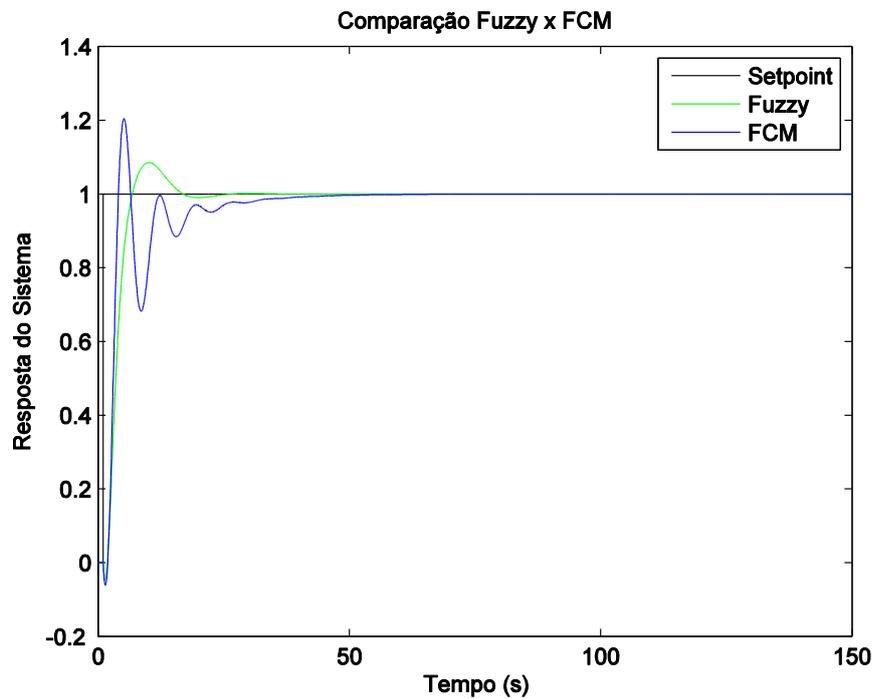


Figura 64 – Comparação do sistema de terceira ordem com zero
Fonte: autoria própria.

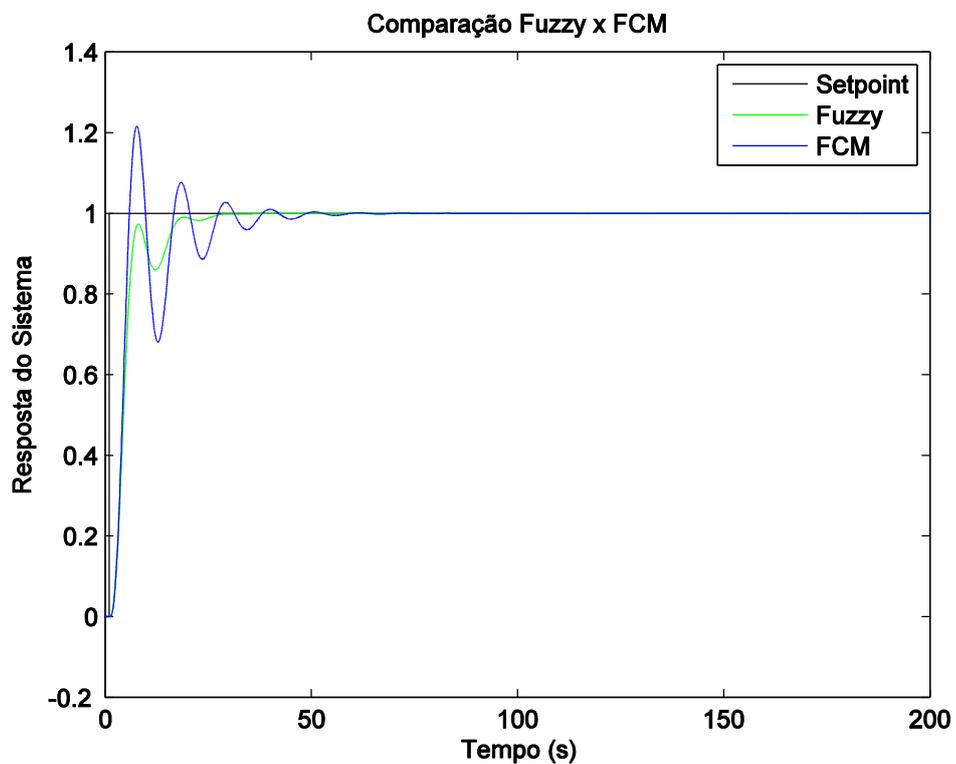


Figura 65 – Comparação do sistema de quarta ordem
Fonte: autoria própria.

Os resultados com maior discrepância na comparação entre a utilização das duas ferramentas foram para o sistema de quarta ordem da equação (16). Devido ao ajuste por FCM registrar *overshoot* de 21,56% combinado ao maior tempo de acomodação dos testes (26,05s), o ajuste pelo Fuzzy apresentou resultado acentuadamente superior (IAE 23,83% menor), como pode ser observado na Figura 65. Outro fator que contribuiu pela superioridade do Sistema Fuzzy neste teste foram seus resultados de *overshoot* (nulo) e bom tempo de acomodação (15,95s).

A Figura 66 compara os resultados para o sistema de quarta ordem com zero (equação (17)). Nota-se que em ambos os sistemas de quarta ordem, o ajuste por *Fuzzy* apresentou *overshoot* nulo. Entretanto, a adição de um zero no sistema faz com que ambos possuam resposta mais rápida e com maior oscilação. Neste ajuste observa-se claramente, mais uma vez, um resultado melhor do controlador Fuzzy em relação ao FCM (IAE 14,84% inferior).

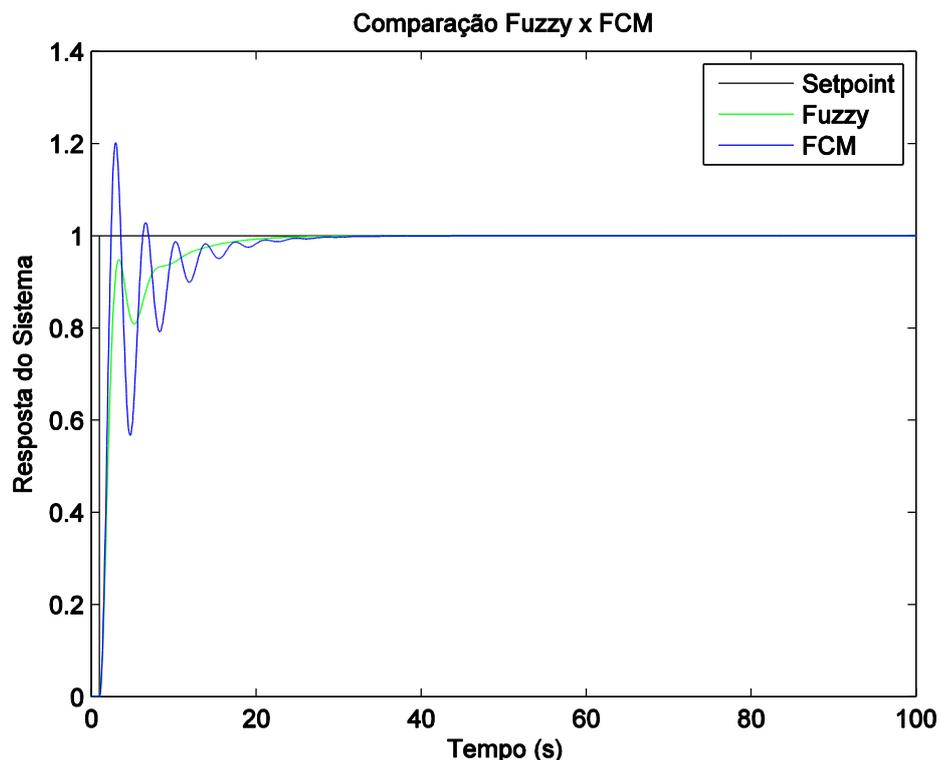


Figura 66 – Comparação do sistema de quarta ordem com zero
Fonte: autoria própria.

As simulações utilizando os sistemas de quinta ordem foram as que apresentaram resultados com dinâmicas mais semelhantes entre os dois métodos de ajuste. Observando os resultados da simulação da equação (18) (Figura 67),

identifica-se que ambos ajustes levaram o sistema a oscilação em período transitório. Todavia, a resposta do ajuste realizado por *Fuzzy* apresentou maior acomodação (IAE 15,9% menor) levando o sistema ao regime permanente em 4,74s (tempo 27,1% mais baixo em relação ao observado no ajuste por FCM).

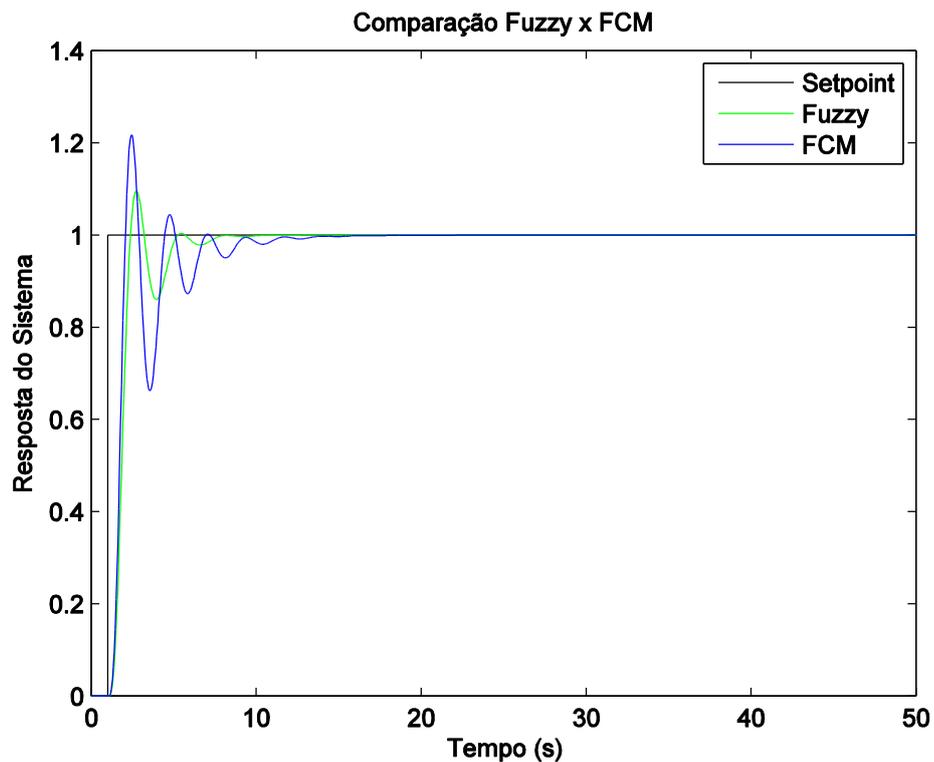


Figura 67 – Comparação do sistema de quinta ordem
Fonte: autoria própria.

O último sistema dinâmico genérico simulado, descrito pela equação (19), apresentou os resultados com maior aproximação entre os ajustes pelas duas técnicas inteligentes utilizadas neste trabalho. Apesar desta notável semelhança (Figura 68), o ajuste realizado pelo Sistema *Fuzzy* obteve uma resposta com tempo de acomodação significativamente mais baixo que o obtido pelo FCM (-29,4%), o que reduziu seu erro acumulativo e tornou sua resposta mais satisfatória (IAE 14,05% menor). Importante também salientar que os valores de *overshoot* e tempo de subida tiveram resultados com baixas variações entre os dois sistemas inteligentes, sendo 5,5% e 2,5% respectivamente.

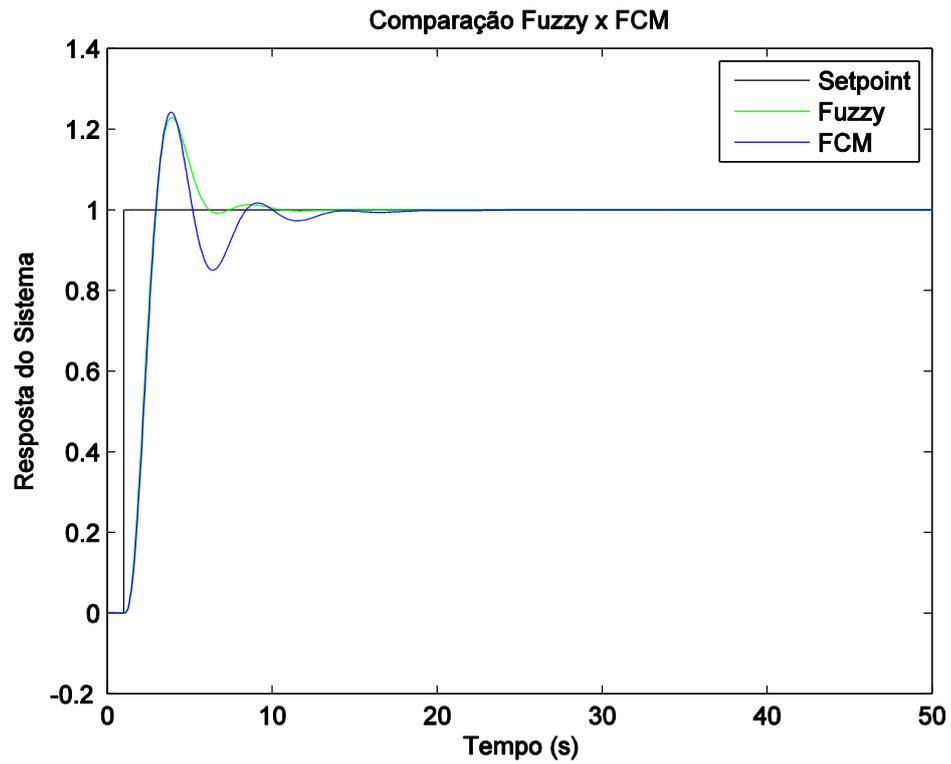


Figura 68 – Comparação do sistema de quinta ordem com zero
 Fonte: autoria própria.

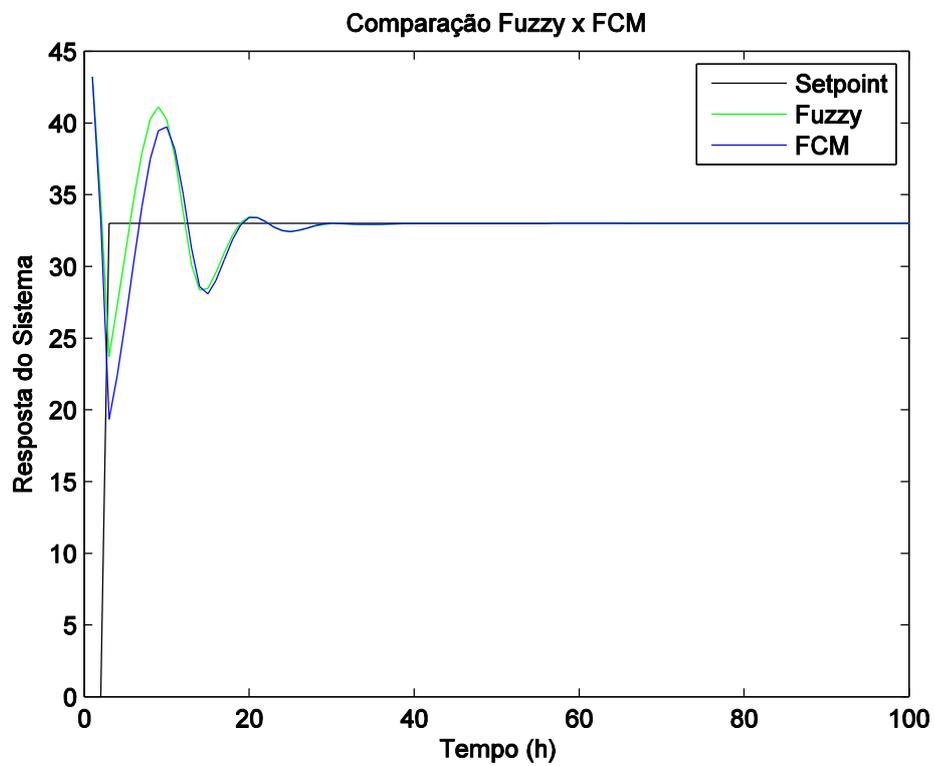


Figura 69 – Comparação do processo de fermentação alcoólica
 Fonte: autoria própria.

Compreende-se através da Figura 69 que, comparado com o ajuste pelo Sistema *Fuzzy*, a resposta resultante do ajuste utilizando FCM possui *overshoot* inferior, porém maior tempo de subida. Essa característica faz com que seu resultado seja levemente inferior.

Tabela 19 - Resumo dos resultados encontrados

		Z.N.	T.L.	<i>Fuzzy</i>	FCM
3ª Ordem s/ zero	Erro IAE	59,186	69,6033	34,3685	40,9787
	Sobressinal	41,97%	3,91%	17,54%	27,98%
	Tempo de Subida	2,88 s	3,35 s	2,66 s	2,34 s
	Tempo de acomod.	12,13 s	19,28 s	6,57 s	6,63 s
3ª Ordem c/ zero	Erro IAE	64,0904	190,5449	71,2539	91,8419
	Sobressinal	25,38%	0%	8,5%	20,45%
	Tempo de Subida	3,79 s	32,07 s	5,64 s	3,86 s
	Tempo de acomod.	10,71 s	47,9 s	13,17 s	18,04 s
4ª Ordem s/ zero	Erro IAE	93,3943	355,8261	91,8589	120,6017
	Sobressinal	17,66%	0%	0%	21,56%
	Tempo de Subida	5,67 s	60,28 s	6,59 s	5,51 s
	Tempo de acomod.	15,85 s	87,52 s	15,95 s	26,05 s
4ª Ordem c/ zero	Erro IAE	42,3763	170,2596	47,3961	55,66
	Sobressinal	17,67%	0%	0%	20,22%
	Tempo de Subida	2,33 s	28,91 s	2,92 s	2,28 s
	Tempo de acomod.	9,77 s	40,42 s	10,72 s	12,98 s
5ª Ordem s/ zero	Erro IAE	31,6504	86,8097	30,4467	36,2148
	Sobressinal	23,48%	0%	9,54%	21,67%
	Tempo de Subida	2,16 s	14,2 s	2,25 s	2,03 s
	Tempo de acomod.	4,69 s	20,67 s	4,74 s	6,5 s
5ª Ordem c/ zero	Erro IAE	61,6055	81,332	38,5226	44,8242
	Sobressinal	37,6%	0%	22,84%	24,16%
	Tempo de Subida	2,83 s	3,4 s	2,76 s	2,83 s
	Tempo de acomod.	8,52 s	22,52 s	5,51 s	7,81
Fermentador	Erro IAE	386,0325	231,8972	152,4578	159,2202
	Sobressinal	29,78%	30,3%	24,63%	20,36%
	Tempo de Subida	11 h	9 h	5 h	6 h
	Tempo de acomod.	54 h	30 h	18 h	18 h

Fonte: autoria própria.

Para efeito de comparação, a Tabela 19 reúne todos os resultados alcançados pelos sistemas inteligentes, em conjunto com os resultados dispostos pelos ajustes realizados por Ziegler-Nichols e Tyreus-Luyben.

A aplicação de sistemas inteligentes apresentou resultados semelhantes para ambas ferramentas no ajuste automático dos parâmetros do controlador PID aplicado ao processo de fermentação alcoólica.

Em conclusão, observa-se que ambas ferramentas inteligentes são efetivas, na maioria dos casos estudados, na tomada de decisão para ajuste automático dos parâmetros dos controladores PID, tornando as respostas satisfatórias. Entretanto, o Sistema *Fuzzy* apresenta melhores resultados em comparação aos dispostos pelos ajustes utilizando FCM.

6 CONCLUSÃO

Um das alternativas para alcançar melhores resultados nos controles industriais está na correta aplicação dos recursos humanos e tecnológicos. Dentro desta premissa, neste trabalho foi realizado um estudo comparativo aplicando o ajuste automático dos parâmetros do controlador PID utilizando técnicas computacionais inteligentes para avaliação e tomada de decisão sobre a resposta dos sistemas controlados.

É importante salientar que este algoritmo não isenta totalmente a necessidade de intervenção do operador no *start* do procedimento, pois é essencial que se escolha corretamente o valor do ganho proporcional inicial e do valor de incremento. Caso esses valores sejam escolhidos erroneamente, o ajuste pode levar muito tempo ou fazer com que a resposta do sistema inicie em instabilidade, o que impossibilita a sequência do método.

O resultado das simulações demonstra que o algoritmo proposto é capaz de avaliar a resposta da planta, tomar decisão de acordo com esta análise e aplicar mudanças nos parâmetros do controlador PID de maneira a alcançar melhores resultados, em comparação aos iniciais. Conforme descrito no capítulo 3, se o algoritmo é capaz de satisfazer os três requisitos acima, este é caracterizado como um sistema adaptativo, neste caso, aplicado ao ajuste automático.

De maneira geral, os resultados comprovam a capacidade de ajuste automático do algoritmo, tanto utilizando *Fuzzy* quanto FCM, de acordo com as simulações em sistemas de diferentes ordens, com e sem a presença de zero na função de transferência. Esta conclusão foi adquirida através da análise comparativa com o ajuste de Tyreus-Luyben, método utilizado para aquisição dos parâmetros iniciais.

No que se diz respeito à comparação entre as duas técnicas inteligentes, conclui-se que o Sistema *Fuzzy*, por possuir uma estrutura mais completa, é capaz de prover melhores resultados. Esta ferramenta computacional possui uma série de elementos que podem ser alterados em um ajuste fino e alcançar um resultado mais refinado.

Por outro lado, os Mapas Cognitivos *Fuzzy* dispõem de um formalismo matemático mais simples, o que *a priori*, facilita embarca-lo em plataformas microcontroladas de baixo custo, como por exemplo, a plataforma Arduino (Yesil et al., 2011).

Em relação às diferentes ordens dos sistemas, não foi notado influência positiva ou negativa na eficácia do ajuste proposto. Observa-se que as respostas possuem características similares, para cada método inteligente, e que o resultado varia de sistema para sistema, independentemente de sua ordem.

Outras funcionalidades podem ser adicionadas ao algoritmo em trabalhos futuros para alcançar melhores resultados e/ou aplica-lo em sistemas reais. Seguindo uma metodologia semelhante à deste trabalho, é possível desenvolver as seguintes funções:

- Atribuição de uma rotina que ajuste automaticamente os parâmetros em sistemas que são naturalmente instáveis. Para tal, é necessário identificar a resposta do sistema para ganho proporcional próximo de zero e desenvolver um código que leve os polos complexos até o eixo $j\omega$;
- Alteração da função que executa os sistemas para realizar uma avaliação/ajuste *online*, ou controle adaptativo propriamente dito. Para esta aplicação, sugere-se uma análise preditiva da resposta, através do erro atual e da variação do erro, para alteração dos parâmetros do controlador durante uma campanha de simulação;
- Utilização de *hardwares* de comunicação para implementação em sistemas reais. Uma vez que no algoritmo as respostas dos sistemas simulados são obtidas através de funções, é possível substituir apenas as funções por outras contendo a interface com o sistema físico, para obtenção dos dados a serem avaliados pelos sistemas inteligentes.

Além dos resultados apresentados, este trabalho pode contribuir na compreensão dos conceitos de controladores PID, técnicas de sintonia e aplicações de sistemas inteligentes no meio acadêmico.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Otacílio M; COELHO, Antonio A. R. **Controlador PID com escalonamento nebuloso dos ganhos: auto-sintonia, análise e implementação.** V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Canela, 2001.

ASTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. **Advanced PID control.** Lund University of Technology. Lund, Suécia, 2006.

ASTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. **The future of PID control.** Lund University of Technology. Lund, Suécia, 2001.

AXELROD, Robert M. **Structure of decision: the cognitive maps of political elites.** New Jersey, Princeton University Press, 1976.

BERTO, M; Sá, F; Junior, V. S. **Avaliação de controle PID adaptativos para um sistema de aquecimento resistivo de água.** Ciência, Tecnologia e Alimentação. Campinas, 2004.

CHUN-YUAN, L.; MIAN-HUAN, W.; DA-WEI, L. **Combined control of Single Neuron PID and normal PID os switched reluctance motor.** 2011. Pp. 146-149, International Conference on Consumer Electronics, Communication and Networks. 2011

COELHO, Carlos A. S. **Auto-ajuste de controladores PID usando método da linearização harmônica.** 2004. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FERREIRA, Cesar. **Estudo comparativo entre as técnicas de controle fuzzy, PI e adaptativo aplicado ao processo de fabricação de papel reciclado utilizando a ferramenta Delta Tune.** 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

FIGUEIREDO, Luiz C.; JOTA, Fábio G. **Implementação de técnicas de controle adaptativo ao resfriamento de tiras a quente.** XV Congresso Brasileiro de Automática, p.1-6, 2004.

FRANCHI, Claiton M. **Controle de processos industriais: princípios e aplicações.** São Paulo: Ed. Érica, 2011.

GOODWIN, Graham C.; GRAEBE, Stefan F.; SALGADO, Mario E. **Control system design**. Valparaíso, Chile, 2000.

GOSMANN, Hugo Leonardo. **Um sistema multivariável de tanques acoplados para avaliação de técnicas de controle**. 2002. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

JUNIOR, José R. C. **Controladores PID industriais com sintonia automática por realimentação a relé**. 1999. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1999.

KANDASAMY, W. B . Vasantha; SMARANDACHE, Florentin. **Fuzzy cognitive maps and neutrosophic cognitive maps**. Xiquan, Phoenix, 2003.

KING, P.J; MAMDANI, E.H. **The application of Fuzzy control systems to industrial process**. Automática, 1977.

KOSKO, Bart. **Fuzzy cognitive maps**. Int J Man-Machine Studies, p.65-75, 1986.

MAHER, M. **Modélisation et elaboration d'algorithmes d'estimation et de commande: application à um bioprocédé**. 1995. Tese de Doutorado - Université Paul Sabatier, Toulouse, França, 1995.

MARRO, Alessandro A. et al. **Lógica fuzzy: conceitos e aplicações**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte., 2011.

MATAS, Alexandre Luis. **Sintonia de controladores PID com controle adaptativo por modelo de referência (MRAC) aplicado a um motor de corrente contínua**. 2012. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012.

MCNEILL, F. Martin; THRO, Ellen. **Fuzzy logic: A practical approach**. 350p. Academic Press, 1994.

MELO JUNIOR, Wilson S. et al. **Controle preditivo multivariável baseado em um modelo adaptativo aplicado a um fermentador alcoólico**. XIV Congresso Brasileiro de Automática. Natal, 2002.

MENDONÇA, Márcio. **Uma contribuição ao desenvolvimento de sistemas inteligentes utilizando redes cognitivas dinâmicas**. 2011. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Curitiba, 2011.

MENDONÇA, Márcio; ARRUDA, Lucia V. R. de; JUNIOR, Flávio N. **Redes dinâmicas cognitivas aplicadas no controle supervisorio de um fermentador**. 2011. SBA Controle e Automação, vol. 2. Campinas, 2011.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. São Paulo: Prentice Hall (Pearson), 2003.

PAPAGEORGIU, E; STYLIOU, C; GROUMPOS, P. **Novel for supporting medical decision making of different data types based on Fuzzy Cognitive Map Framework**. Annual International Conference of the IEEE EMBS Cité Internationale. Lyon, 2007.

PASSINO, M. K; YOURKOVICH, S. **Fuzzy control**. Menlo Park: Addison-Wesley, 1997.

ROSS, Timothy J. **Fuzzy logic with engineering applications**. Vol 2, 2004.

STYLIOU, C. D.; GROUMPOS, P. P; GEORGOPOULOS, V. C. **An fuzzy cognitive map approach to process control systems**. *Advanced Computational Intelligence*, 1999.

ZADEH, Lotfi. A. **Fuzzy algorithms**. Vol. 12, 1968.

ZIEGLER, John G; NICHOLS, Nathaniel B. **Optimum settings for automatic controllers**. Transactions of the ASME, 1942.

YESIL, Engin; DODURKA, M. Furkan; SAKALLI, Ahmet; GUZAY, Cagri; OZTURK, Cihan. **Self-tuning PI controller via fuzzy cognitive maps**. Istanbul Technical University. Istanbul, Turquia, 2011.

YU, Cheng-Ching. **Autotuning of PID controllers**. Springer, 2ed., 261p. 2006.