



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



Controlador auto-supervisionável em duas camadas para aplicações remotas

Autor: Giorgio André Guerra Rigoni

Orientador: Pedro Rafael Bolognese Fernandes

Porto Alegre, dezembro de 2013

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	2
2.1	Controle em Duas Camadas	2
2.2	Controle Baseado em Modelo Interno	3
2.2.1	Aplicação do Método IMC	4
2.3	Variabilidade em Malhas de Controle	5
2.4	<i>Extremum Seeking</i>	6
3	Metodologia	7
3.1	Estratégia Sugerida	7
3.1.1	Cálculo da Variância	8
3.2	Estudo de Caso	9
3.3	Projeto do Controlador da Camada Inferior	10
3.4	Projeto do Controlador da Camada Superior	12
3.4.1	Controle <i>Extremum Seeking</i>	13
4	Resultados e Discussão	17
4.1	Teste I	17
4.2	Teste II	18
4.3	Teste III	21
4.4	Ensaio na Planta Piloto	22
4.5	Discussão	24
4.5.1	Teste IV	26
5	Conclusões	28
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	28
5.1.1	Utilização de Filtro Passa-baixa	29
5.1.2	Controle com Dois Graus de Liberdade	29
5.1.3	<i>Extremum Seeking</i> como Malha Principal de Controle	29
6	Referências	30

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Sidette Luiza Caron Guerra e Adelar Rigoni, por todo apoio ao sair de casa e durante os anos de faculdade.

Ao Rômulo Fernando Guerra Rigoni, meu irmão, por não deixar a casa virar uma zona durante o período de elaboração do meu trabalho de conclusão de curso.

Agradeço à minha namorada, Carmela Rampazzo Bresolin, por todo apoio durante este último ano de faculdade e por me agüentar nesta reta final do curso.

Aos meus colegas da Engenharia pela companhia durante o curso, pelas risadas, almoços e pela honra de me formar na companhia de alguns de vocês.

Agradeço ao meu orientador, Pedro Rafael Bolognese Fernandes, sempre muito bem humorado, por todo apoio, dedicação e paciência ao me orientar neste trabalho, além de ser um ótimo professor durante o curso.

Resumo

Após a implementação do sistema de controle de um determinado processo, o aumento de variabilidade das variáveis controladas pode ser consequência do envelhecimento de ativos, falha em sensores, mudanças no ponto de operação, troca de equipamentos, entre outros fatores. Seria desejável que o controlador exibisse a capacidade de se adaptar frente a estas alterações. A redução da variabilidade em malhas de controle pode trazer vantagens tais como redução do consumo de energia e de matéria-prima, menor tempo de transição entre pontos de operação, menor quantidade de produtos fora de especificação, entre outros. Com tal objetivo, este trabalho propõe uma arquitetura de controlador auto-supervisionável capaz de se adaptar a pequenas variações no processo, através da separação dos objetivos de controle em duas camadas. A camada inferior é responsável pelo controle regulatório, é implementada junto ao processo controlado, e neste trabalho é obtida pelo método IMC, *Internal Model Control* em função de um único parâmetro de ajuste. A camada superior, remota à aplicação, é responsável pela otimização do controlador, e para isso utiliza o método de *Extremum Seeking Control*. A concepção desta arquitetura prevê que a comunicação entre as duas camadas pode ser feita por uma rede não-determinística, e a estabilidade da malha não deve ser comprometida com a perda desta comunicação. Para os testes com o controlador, um modelo não-linear da planta laboratorial de tanques esféricos foi utilizado, e após o desenvolvimento do controlador, um ensaio na planta real foi realizado. Os resultados com o controlador desenvolvido foram satisfatórios, sendo este capaz de reduzir em tempo real a variabilidade na malha de controle mesmo com influência de perturbações no processo.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Diagrama da estrutura de controle em duas camadas.....	2
Figura 2.2: Diagrama da estrutura de controle em duas camadas para processos em batelada. .	3
Figura 2.3: Diagrama de blocos da estrutura IMC.	4
Figura 2.4: Diagrama de blocos da estrutura clássica de controle.	4
Figura 2.5: Diagrama de blocos do método para sistemas discretos.	6
Figura 3.1: Diagrama de blocos básico da arquitetura do controlador proposto.	8
Figura 3.2: Planta de tanques esféricos do LACIP.	9
Figura 3.3: Resultado do ensaio de identificação do sistema.	10
Figura 3.4: Relação entre o parâmetro λ e a variância do erro.	12
Figura 3.5: Diagrama de blocos no <i>Simulink</i> para o cálculo da variância.	13
Figura 3.6: Diagrama de blocos utilizado para implementar o controle <i>Extremum Seeking</i>	13
Figura 3.7: (a) Modulação do parâmetro λ e (b) o efeito causado no sinal de variância.	14
Figura 3.8: Sinal de variância modulado antes de ser filtrado, em vermelho, e após ser filtrado, em azul.	15
Figura 3.9: (a) Sinal de variância filtrado e o sinal de demodulação e em (b) Resultado da demodulação.	16
Figura 4.1: Nível do tanque (PV) no Teste I.	17
Figura 4.2: Valor do parâmetro λ no Teste I.	18
Figura 4.3: Sinal de variância no Teste I.	18
Figura 4.4: Nível do tanque (PV) no Teste II.	19
Figura 4.5: Valor do parâmetro λ no Teste II.	19
Figura 4.6: Sinal de variância no Teste II.	20
Figura 4.7: Teste em que o parâmetro não converge para o ótimo . Em (a) é mostrado o nível do tanque, e em (b) o valor do parâmetro λ	20
Figura 4.8: Comparação do nível do tanque entre os dois controladores. Em (a) com controlador <i>Extremum Seeking</i> (Estimativa inicial $\lambda = 0,6$), e em (b) com o controlador fixo ($\lambda = 0,6$).	21
Figura 4.9: Comparação do sinal de variância entre os dois controladores. Em (a) com controlador <i>Extremum Seeking</i> (Estimativa inicial $\lambda = 0,6$), e em (b) com o controlador fixo ($\lambda = 0,6$).	22
Figura 4.10: Nível do tanque (PV) no ensaio realizado na planta piloto.	23
Figura 4.11: Valor do parâmetro λ no ensaio realizado na planta piloto.	23
Figura 4.12: Sinal de variância no ensaio realizada na planta piloto.	24
Figura 4.13: Curva obtida para a relação entre o parâmetro λ modulado e a variância.	25
Figura 4.14: Detalhe da região de interesse da relação entre o parâmetro λ modulado e a variância.	25

Figura 4.15: Comparação do nível do tanque entre os dois controladores. Em (a) com controlador *Extremum Seeking* (Estimativa inicial $\lambda = 0,3$), e em (b) com o controlador fixo ($\lambda=0,3$)..... 26

Figura 4.16: Comparação do sinal de variância entre os dois controladores. Em (a) com controlador *Extremum Seeking* (Estimativa inicial $\lambda = 0,3$), e em (b) com o controlador fixo ($\lambda = 0,3$)..... 27

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Parâmetros e resultados do Teste I.	18
Tabela 4.2: Parâmetros e resultados do Teste II.	20
Tabela 4.3: Médias do sinal de variância obtidas na simulação III.	22
Tabela 4.4: Dados e resultados do ensaio na planta piloto.	24
Tabela 4.5: Médias do sinal de variância para o Teste IV.	27

Lista de Símbolos

θ : Atraso de transporte

$n(d)$: Índice de Harris

σ_{mv}^2 : Mínima variância teórica

σ^2 : Variância

$\overline{\sigma^2}$: Média da variância

λ : Parâmetro de sintonia do controlador

ω_1 : Frequência de modulação

$n(d)$: Índice de Harris

$F_{hp}(z)$: Filtro passa-alta no domínio discreto

h : Parâmetro de ajuste do filtro passa-alta

k : Ganho do controlador *Extremum Seeking*

K_c : Ganho proporcional do controlador PI

T_i : Tempo integral do controlador PI

t : Tempo da simulação

ρ : Densidade do líquido

M : Massa de líquido

D : Diâmetro do tanque

h : Altura da coluna de líquido

Lista de Abreviaturas e Siglas

GPRS: *General Packet Radio Service*

3G: *Third generation of mobile telecommunications technology*

IMC: *Internal Model Control*

PI: *(Controller) Proportional-Integral*

ILC: *Iterative Learning Control*

MPC: *Model Predictive Control*

NMPC: *Nonlinear Model Predictive Control*

SP: *Set-point*

PV: *Process Variable*

1 Introdução

Em muitos processos, seria desejável que o controlador exibisse a capacidade de se adaptar frente a alterações na planta que tendem a deteriorar o desempenho da malha de controle. Estas mudanças podem ser, por exemplo, consequência do envelhecimento do sistema, falha em sensores, mudanças no ponto de operação, troca de equipamentos, entre outros fatores que aumentam a variabilidade do processo. Motivado pelo estudo de Brand (2009), que aponta como principal caminho para melhorar o desempenho de controladores industriais a redução da variabilidade em malhas de controle, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma arquitetura de controlador em duas camadas para aplicações remotas de mini-unidades industriais. O objetivo desta estratégia é ao mesmo tempo o controle adequado e robusto da variável controlada e a redução da variabilidade das malhas de controle. Além da motivação inicial, a exploração de petróleo em águas profundas e a operação de equipamentos remotos de maneira barata, confiável, mas com uma camada de otimização remota são aplicações que esta arquitetura de controlador pode oferecer resultados promissores.

A estrutura do controlador proposto é dividida em dois níveis, ou camadas: a camada inferior, responsável pelo seguimento de referências e estabilização do processo, e a superior, responsável pela otimização do controle. A camada inferior, em aplicações reais, é implementada localmente, junto ao processo controlado. Já a camada superior é projetada de forma a operar remotamente, e como canal de comunicação entre ambas pode-se utilizar uma rede de telecomunicação, como, por exemplo, uma rede de telefonia móvel (*GPRS* ou *3G*). Por este motivo, as duas camadas devem operar com períodos de amostragem distintos, e a perda da comunicação entre elas não deve instabilizar o processo controlado.

Este trabalho é estruturado na seguinte ordem: o capítulo 2 apresenta os conceitos utilizados durante o desenvolvimento do controlador e trabalhos anteriores que trataram de objetivos semelhantes na literatura. O capítulo 3 apresenta a metodologia usada para a síntese dos controladores e justificativas de modificações de conceitos originais dos métodos empregados. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com a arquitetura de controlador desenvolvida através de simulações e de teste real, bem como a discussão sobre estes resultados. As conclusões sobre o trabalho são apresentadas no capítulo 5, e sugestões para a continuação e aperfeiçoamento da técnica são listadas no capítulo 6.

2 Revisão Bibliográfica

Em unidades industriais, controladores *single-loop* são utilizados em larga escala há mais de 70 anos (Åström *et al.*, 1993). A maioria das malhas resultantes é ajustada de forma manual, levando a uma degradação do controle ao longo do tempo devido a mudanças nas características do processo, envelhecimento de equipamentos e falhas em sensores e atuadores (Åström, 1993). Além disso, em processos com características de não-linearidade, mudanças de ponto de operação podem acarretar a necessidade de reajuste de parâmetros do controlador.

Åström (1993) aponta que as chamadas técnicas de controle adaptativo e de auto-sintonia começaram a surgir na década de 80, permitindo aos controladores se ajustarem de forma automática frente a mudanças de parâmetros e de desempenho do sistema.

A seguir, são revisados alguns conceitos usados no desenvolvimento desta proposta de controlador auto-supervisionável.

2.1 Controle em Duas Camadas

Uma estratégia possível para controlar uma planta de forma ótima é dividir o problema em duas camadas, ou níveis de resolução: uma, local, responsável pelo controle regulatório, e outra, remota, responsável pela otimização do processo propriamente, conforme Liu *et al.*(2009) e Liu *et al.*(2008). Os autores propõem esta divisão de acordo com a natureza das variáveis: na camada inferior, responsável pela estabilização do sistema e pelo seguimento de referências, as variáveis utilizadas são síncronas para garantir que o controle seja determinístico, e um algoritmo MPC (*Model Predictive Control*) é usado como controlador. Já na camada superior, responsável pela otimização do processo, medições e atuações assíncronas são usadas em conjunto com leituras síncronas em um algoritmo NMPC (*Nonlinear Model Predictive Control*), que tem como objetivo manter o sistema em uma condição ótima de operação através de um problema de otimização não-linear. Por utilizar informações que dependem de redes não-determinísticas, as leituras e as atuações que estão sujeitas a atrasos e perdas de dados são usadas apenas para melhorar o desempenho do sistema, e não são cruciais para garantir a robustez do mesmo. Na Figura 2.1 é mostrado o diagrama desta estrutura.

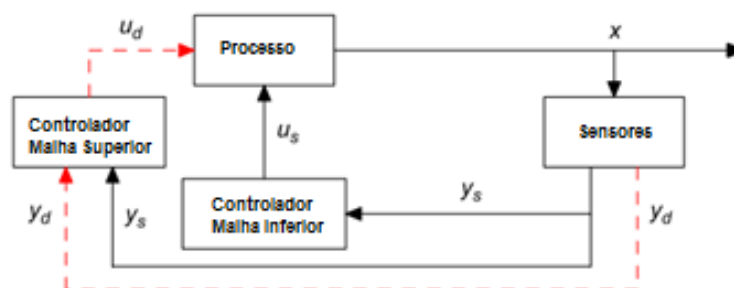


Figura 2.1: Diagrama da estrutura de controle em duas camadas.
Retirado de Liu *et al.* (2008).

Outro modo de considerar esta separação é considerado por Wang, Liu e Zhao(2012). Neste, o processo a ser controlado, por premissa, opera em bateladas, e a trajetória a ser seguida pela variável controlada é a mesma em todas estas. A camada inferior de controle é

composta por um controlador PI. A entrada de referência deste controlador é a variável manipulada da camada superior, ou seja, esta utiliza a entrada de referência do controlador interno como variável manipulada. Já a trajetória de referência que a variável controlada deve seguir passa a ser uma entrada da camada superior. Esta utiliza o erro de seguimento de trajetória e dados de bateladas anteriores para calcular a compensação na batelada atual. Nesta estrutura, variáveis não-determinísticas não são usadas, já que a camada inferior é por definição determinística e a camada superior somente atua nestas variáveis, com base em valores passados destas. Na Figura 2.2 é mostrado o diagrama detalhado desta abordagem, com o controlador PI em destaque.

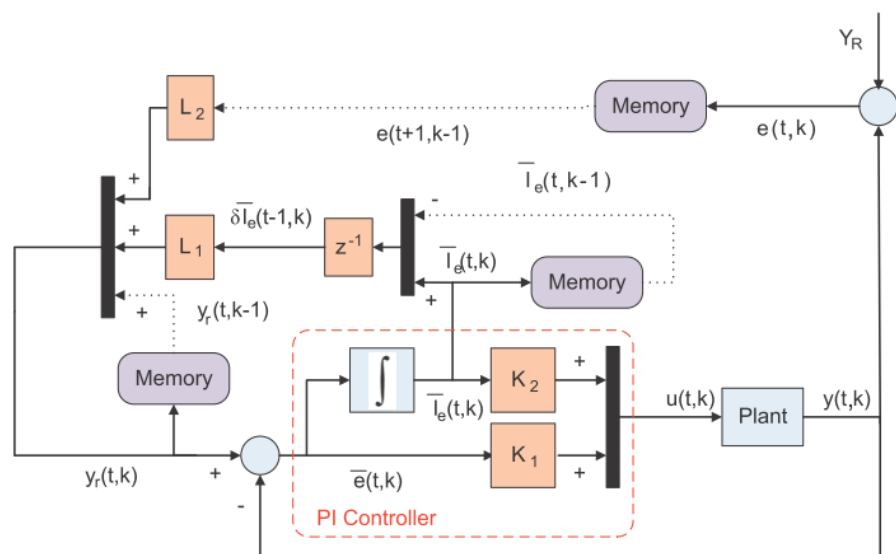


Figura 2.2: Diagrama da estrutura de controle em duas camadas para processos em batelada. Retirado de Wang, Liu e Zhao (2012).

2.2 Controle Baseado em Modelo Interno

O controle baseado em modelo interno (*Internal Model Control*, ou IMC) é um método de síntese de controladores que, apesar de geralmente não resultar em um controle com alto desempenho, apresenta um bom compromisso entre desempenho e robustez na maioria das aplicações (Rivera, 1999), o que é uma característica importante em processos industriais.

O diagrama de blocos que representa a estrutura deste método é mostrado na Figura 2.3. Através da álgebra de blocos, pode-se obter o diagrama equivalente mostrado na Figura 2.4, o qual representa uma estrutura usual de controle *feedback*. Quando o método é aplicado com modelos de baixa ordem, o controlador obtido após a transformação do sistema no equivalente mostrado na Figura 2.4 é do tipo PI ou PID.

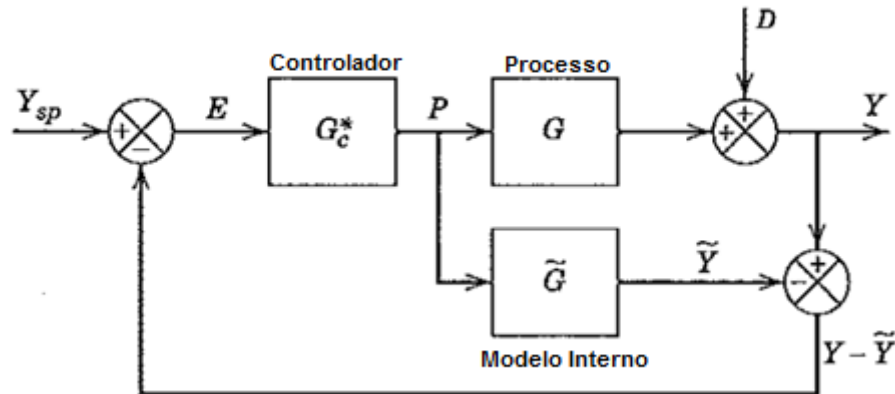


Figura 2.3: Diagrama de blocos da estrutura IMC.
Retirado de Seborg, Edgar e Mellichamp (2004).

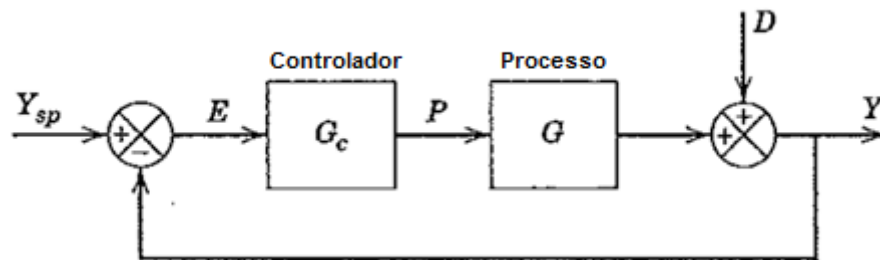


Figura 2.4: Diagrama de blocos da estrutura clássica de controle.
Retirado de Seborg, Edgar e Mellichamp (2004).

Na Figura 2.3 e na Figura 2.4, Y_{sp} é o valor de referência, E é o erro de seguimento de referência, P representa a variável manipulada, D representa uma perturbação não medida e Y é o valor da variável controlada.

Os blocos G e \tilde{G} representam a planta e o modelo aproximado desta, respectivamente. G_c e G_c^* são os controladores, sendo o primeiro na estrutura clássica e o segundo na estrutura de blocos do IMC.

A equação que relaciona as duas estruturas é dada por:

$$G_c = \frac{G_c^*}{1 - G_c^* \tilde{G}} \quad (2.1)$$

2.2.1 Aplicação do Método IMC

Para aplicação do método IMC, é necessário um modelo \tilde{G} do processo a ser controlado na forma de função de transferência, o qual pode inclusive conter atraso de transporte e pólos no semi-plano complexo direito, se este for o caso (Seborg, Edgar e Mellichamp, 2004).

Se a função de transferência contiver atraso de transporte, alguma forma de aproximação deve ser usada para que o método resulte em um controlador realizável. Duas aproximações são geralmente usadas, a de Padé e a de Taylor, e são mostradas a seguir. Independente de qual aproximação seja usada, o ganho estático da função aproximada deve ser unitário (Seborg, Edgar e Mellichamp, 2004).

- Aproximação de Padé

$$e^{-\theta s} \approx \frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s} \quad (2.2)$$

- Aproximação de Taylor

$$e^{-\theta s} \approx 1 - \theta s \quad (2.3)$$

Após substituir-se o atraso de transporte por uma aproximação, fatora-se a função de transferência do modelo resultante em duas partes:

$$\tilde{g} = \tilde{g}_+ \tilde{g}_- \quad (2.4)$$

Onde \tilde{g}_+ contém todos os elementos de fase não-mínima, e \tilde{g}_- é a parcela invertível do modelo. Com isso, o controlador é obtido através da equação a seguir:

$$G_c^* = \frac{1}{\tilde{g}_-} f \quad (2.5)$$

Onde f é um filtro passa-baixa com ganho unitário, da forma:

$$f = \frac{1}{(\tau_c s + 1)^r} \quad (2.6)$$

O parâmetro r é usado para ajustar o grau relativo do controlador e torná-lo realizável. Para obter o controlador na forma clássica mostrada na Figura 2.4, basta substituir (2.5) em (2.1).

2.3 Variabilidade em Malhas de Controle

Brand (2009) afirma que reduzir a variabilidade em malhas de controle é um dos principais caminhos para obter melhorias e benefícios na indústria, como redução no consumo de energia, redução de produtos fora de especificação, aumento de capacidade, redução no transiente entre especificação de produtos, melhora na operabilidade, entre outras vantagens. A autora também mostra que o desempenho de um controlador pode ser traduzido em alteração na variabilidade da malha de controle, através de índices não invasivos.

O Índice de Harris é o índice não-invasivo mais difundido usado para avaliar o desempenho de uma malha de controle com base na variabilidade, relacionando a variância da malha de controle com a mínima variância teórica que pode ser obtida para o sistema, e é estruturado da seguinte forma (Harris, 1989):

$$n(d) = 1 - \frac{\sigma_{mv}^2}{\sigma^2} \quad (2.7)$$

Onde σ_{mv}^2 é a estimativa da variância mínima teórica, e σ^2 é a variância medida do sistema. Ao contrário da variância real, que é facilmente obtida a partir do histórico de dados do sistema, a variância mínima teórica deve ser estimada com base na teoria do controlador de variância mínima (Åström, 1970).

2.4 Extremum Seeking

O *Extremum Seeking* é um método de otimização em tempo real, popular entre as décadas de 40 e 60, e que nos anos 90 voltou a ser pesquisado. O método também pode ser classificado como controle adaptativo, mas diferentemente de outros, tais como o ILC (*Iterative Learning Control*), não é baseado em um modelo paramétrico do sistema, sendo esta uma de suas principais vantagens (Ariyur *et. al*, 2003).

O método é baseado na não-linearidade de um sistema, caracterizada pela existência de um ponto de operação ótimo com relação a determinado critério de operação. Esta não linearidade pode ser tanto do processo em si ou introduzida pela função objetivo do controle, como alguma função envolvendo o custo ou outro objetivo a ser minimizado/maximizado (Ariyur *et. al*, 2003).

O diagrama de blocos do método aplicado a sistemas discretos é mostrado na Figura 2.5. A região delimitada representa o processo, e os demais blocos são referentes à implementação do método. $F_i(z)$ representa a dinâmica do parâmetro; $f(\theta)$ representa o mapeamento que resulta na não-linearidade, e $F_o(z)$ representa a dinâmica da planta.

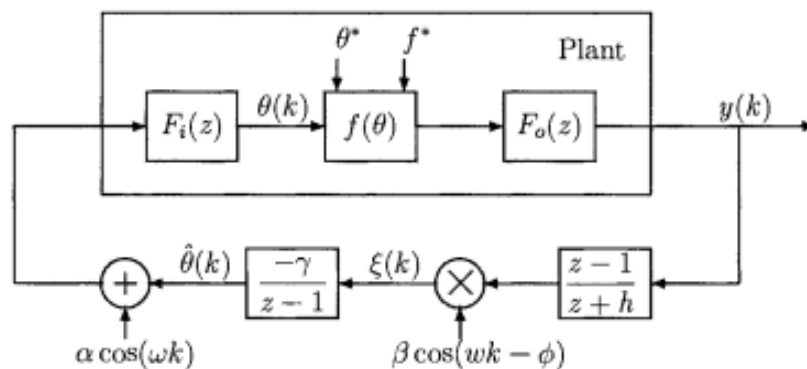


Figura 2.5: Diagrama de blocos do método para sistemas discretos. Retirado de Ariyur *et. al* (2003).

Na Figura 2.5:

- $(z - 1)/(z + h)$ é um filtro passa-alta;
- $\beta \cos(\omega k - \phi)$ é o sinal de demodulação;
- $\frac{-\gamma}{z-1}$ é o controlador;
- $\alpha \cos(\omega k)$ é o sinal de modulação.

A planta tem como uma das suas entradas o parâmetro θ , que resulta em um ponto ótimo de operação em $f^* = f(\theta^*)$, desconhecido. O *Extremum Seeking* direciona o valor de θ em tempo real para o valor ótimo, adicionando uma modulação senoidal. O sinal proveniente da planta, com o efeito da modulação do parâmetro, é filtrado, demodulado e é empregado na entrada do controlador, que gera um novo valor para o parâmetro.

A modulação/demodulação é necessária para obter o gradiente do sistema em relação ao parâmetro que é utilizado como atuação, e assim chegar ao ponto de mínimo de $f(\theta)$. Uma explicação intuitiva e uma análise rigorosa do método são encontradas em (Ariyur *et. al*, 2003).

3 Metodologia

A fim de permitir aplicações nas quais uma planta remota opere de forma autônoma, segura e auto-supervisionável, propõe-se neste trabalho uma estrutura de controle em duas camadas. A camada inferior é destinada ao controle do processo em tempo real, estabilizando-o e rejeitando perturbações. Já a camada superior é responsável por monitorar o desempenho da malha inferior e por ajustá-la caso o desempenho desta esteja deteriorado. O controlador a ser empregado na camada inferior é do tipo PID-IMC, com um parâmetro de ajuste sintonizado pela camada superior de forma a melhorar o desempenho da malha de controle. A questão de comunicação entre a camada superior e a planta remota não será abordada neste trabalho, sendo assumido que esta pode ser feita em tempo real, apesar do tempo de amostragem da malha superior ser significativamente superior do que o da inferior. Pretende-se que esta arquitetura de controlador possa melhorar o desempenho do processo em termos da variabilidade na variável controlada, através de uma adaptação dos parâmetros de sintonia do controlador, porém mantendo a estabilidade e a robustez da malha inferior.

Inicialmente, a estrutura proposta será apresentada e discutida. Posteriormente, a estratégia será testada por meio de simulações computacionais para verificar a adequação e o desempenho da estrutura proposta frente a variáveis da operação da planta (ruído e distúrbios), assim como análises sobre a estabilidade do sistema como um todo. Também estão planejados testes reais de operação com uma planta piloto de nível.

3.1 Estratégia Sugerida

Para aplicações em mini-plantas remotas, o controlador local (da malha inferior) deve ser simples e de fácil implementação. Deste modo, a estrutura de um controlador PI foi escolhida para atuar na regulação do sistema, e o método utilizado para sintetizá-lo foi o IMC. Porém, o ganho deste controlador PI é ajustado através de um único parâmetro, este controlado pela camada superior, a qual tem como objetivo otimizar o desempenho da malha com relação à variabilidade através do ajuste automático e em tempo real deste parâmetro. O controlador da camada superior é baseado no método *Extremum Seeking*, o qual consegue otimizar o desempenho em tempo real, sem a necessidade de um modelo matemático.

Para a síntese do controlador da malha inferior é necessário um modelo do sistema no formato de função de transferência, podendo conter atraso de transporte e pólos no semi-plano complexo direito. Porém, o atraso de transporte deve ser aproximado por uma função com ganho unitário, sendo as mais usadas as aproximações de Taylor e de Padé. Além disso, na sua forma original, o IMC apresenta o parâmetro de ajuste do controlador, τ_c , no denominador, sendo uma fonte de não-linearidade para o controlador da malha inferior. Para evitar esta não-linearidade, o parâmetro λ foi proposto no numerador, com função equivalente ao parâmetro τ_c .

Como medida de desempenho, usou-se o valor da variância, que, além de traduzir o desempenho do controlador, pode ser calculada de forma contínua e sem inserção de perturbações adicionais ao processo. Sabe-se que há um mínimo de variância possível de ser atingido relacionado ao desempenho do controlador, e apesar deste valor não ser conhecido e nem tampouco fixo, a forma da função é conhecida, sendo empregado um controle adaptativo para atingir o mínimo desta função.

O controle adaptativo utilizado é baseado no método *Extremum Seeking*, capaz de direcionar o sistema ao extremo da função objetivo (seja mínimo ou máximo) em tempo real, mas com a desvantagem de apresentar uma oscilação na saída, necessária para obter o valor de gradiente da função a ser minimizada.

A separação entre as duas camadas é feita pela diferença entre os períodos de amostragem. A malha inferior opera com um período de amostragem suficientemente pequeno para controlar o processo, e a camada superior utiliza uma janela finita destes dados para gerar uma amostra para a camada superior, sendo este o mesmo período para a atualização do ganho do controlador da malha inferior.

A Figura 3.1 mostra um diagrama de blocos básicos da arquitetura de controlador proposto.

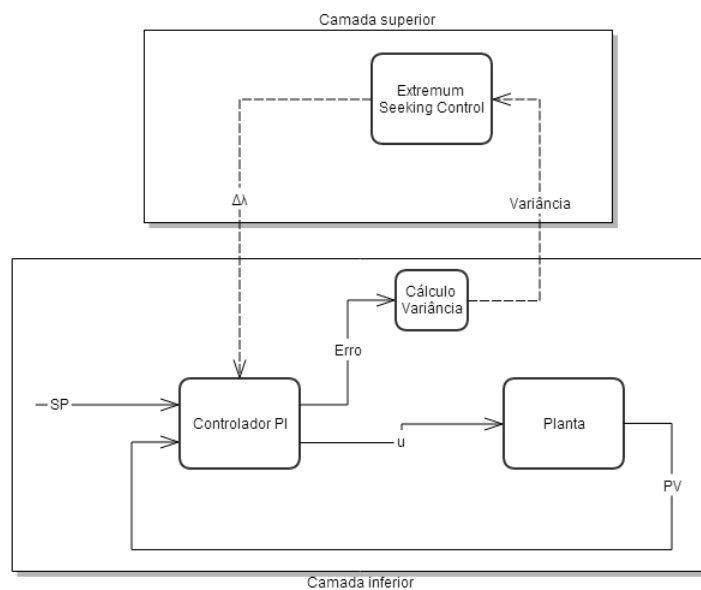


Figura 3.1: Diagrama de blocos básico da arquitetura do controlador proposto.

Na Figura 3.1:

- ESC é o controlador da camada superior;
- PI é o controlador da camada inferior;
- $var(j)$ representa o bloco de cálculo da variância;
- Linhas contínuas representam sinais em tempo real;
- Linhas tracejadas representam os sinais trocados entre as duas camadas.

3.1.1 Cálculo da Variância

Para calcular a variância do erro de seguimento de referência, utilizou-se uma janela de dados ao invés de calcular o índice usando todo sinal, evitando que o histórico influencie no valor atual da variância e possibilitando que as duas camadas operem com períodos de amostragem distintos. O tamanho da janela é definido empiricamente, após realizar ensaios com diferentes valores, observando o comportamento do sinal de variância. Quanto maior o valor desta janela, mais lentamente a camada superior responderá, pois o algoritmo de *Extremum Seeking* é baseado neste período de amostragem.

3.2 Estudo de Caso

A planta utilizada para teste da estratégia desenvolvida neste trabalho é uma planta de tanques esféricos do Laboratório de Controle e Integração de Processos (LACIP), do Departamento de Engenharia Química da UFRGS, mostrada na Figura 3.2. Os tanques em questão têm 22,5 cm de diâmetro, sendo alimentados por bombas submersas com capacidade de vazão de até 5 L/min e são drenados por um orifício no fundo do tanque. O nível é estimado a partir da massa, medida por células de carga que suportam cada tanque. A variável manipulada original da planta é o sinal de comando para cada bomba; porém, para reduzir o efeito da não-linearidade e de distúrbios nas bombas, um controlador de vazão foi incluído numa camada primária de controle, de modo que a vazão é a variável manipulada no controlador desenvolvido. Foi considerada por simplicidade uma configuração SISO pelo controle do nível de um tanque a partir da vazão que alimenta o mesmo. Apesar da variabilidade não ser um fator crítico em malhas de nível, esta planta foi utilizada para o desenvolvimento do trabalho pela possibilidade de realizar ensaios reais e testar o desempenho do controlador.



Figura 3.2: Planta de tanques esféricos do LACIP.

Para o projeto e simulações do controlador, um modelo não-linear da planta no Matlab (*Simulink*) foi utilizado, conforme mostrado nas equações a seguir:

$$\frac{dM}{dt} = \rho F_{in} - \rho F_{out} \quad (3.1)$$

$$M = \rho \frac{\pi}{3} h^2 \left(\frac{3}{2} D - h \right) \quad (3.2)$$

$$F_{in} = k_h \sqrt{h} \quad (3.3)$$

Onde:

$$k_h = 0,6 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$$

$$\rho = 1 \text{ kg/L}$$

3.3 Projeto do Controlador da Camada Inferior

Uma vez que um modelo do sistema é necessário para o projeto do controlador, um teste em degrau foi feito para a identificação do sistema simulado. O ensaio realizado é composto por um degrau na vazão de alimentação, que varia de 2 L/min para 2,2 L/min, em $t = 1200 \text{ s}$. A Figura 3.3 apresenta a saída (nível do tanque, em cm) e a entrada (vazão, em L/min) neste teste, após a remoção dos valores de regime permanente e do período inicial de estabilização. O período de amostragem do sistema é de 1 segundo.

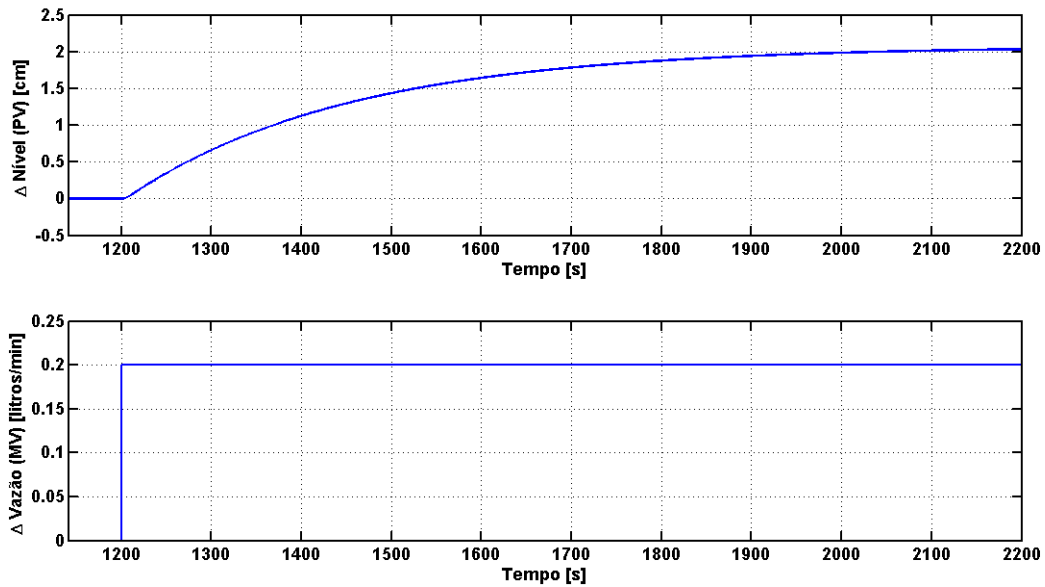


Figura 3.3: Resultado do ensaio de identificação do sistema.

Os dados coletados foram utilizados no *Identification Toolbox* do *Matlab* para ajustar um modelo na forma de função de transferência de primeira ordem com atraso. O modelo obtido no domínio de tempo contínuo é mostrado a seguir:

$$G(s) = \frac{10,3}{(249s+1)} e^{-4s} \quad (3.4)$$

onde as unidades de tempo estão em segundos e o ganho em $\text{cm} \cdot \text{min}/\text{L}$. Para aplicação do método IMC, o atraso de tempo na função de transferência deve ser aproximado por uma função com ganho unitário, como discutido na seção 3.1 deste trabalho. Utilizando-se a aproximação de Taylor, obtém-se:

$$\tilde{G}(s) = \underbrace{(1 - 4s)}_{\tilde{g}_+} \underbrace{\frac{10,3}{(249s+1)}}_{\tilde{g}_-} \quad (3.5)$$

Aplicando o método IMC, com $r = 1$, obtém-se o controlador na forma da Figura 2.3:

$$G_c^*(s) = \frac{(249s+1)}{10,3(\tau_c s+1)} \quad (3.6)$$

Onde τ_c é o parâmetro do filtro f empregado no método. Utilizando álgebra de blocos, pode-se escrever o controlador na forma clássica mostrada na Figura 2.4, conforme mostrado a seguir:

$$G_c(s) = \frac{1}{10,3(\tau_c+4)} \frac{(249s+1)}{s} \quad (3.7)$$

Que pode ser representado com a estrutura de um controlador PI:

$$G_c(s) = K_c \frac{(T_i s+1)}{T_i s} \quad (3.8)$$

Com

$$T_i = 249;$$

$$K_c = \frac{249}{10,3(\tau_c+4)}.$$

Pode-se aplicar também a aproximação de Padé para o atraso de transporte a fim de fatorar o modelo da planta. Porém, o controlador obtido resulta em outra estrutura, com dependência quadrática no parâmetro do filtro, como mostrado a seguir, o que não é desejável:

$$G_c(s) = \frac{(249s+1)(2s+1)}{10,3[(\tau_c s+1)^2-(2s-1)]} \quad (3.9)$$

Portanto, o controlador utilizado para a malha inferior foi obtido por meio da aproximação de Taylor para o atraso de transporte. Utilizou-se a seguinte modificação no equacionamento, substituindo o parâmetro original no denominador por outro de efeito equivalente, como discutido na seção 3.1:

$$G_c(s) = \lambda \frac{1}{10,3} \left(\frac{249s+1}{s} \right) \quad (3.10)$$

Onde

$\lambda = \frac{1}{\tau_c+4}$ é um parâmetro de sintonia (agressividade) do controlador.

Com a estrutura do controlador da malha inferior definido, uma série de simulações foi feita com diferentes valores de λ para observar a relação entre o parâmetro e a variabilidade do erro (SP-PV) em malha fechada. O ensaio consistiu em estabilizar o sistema no *set-point* de 10 cm de nível, com ruído branco adicionado ao sinal de entrada da planta. A variância foi calculada com base no sinal de erro, dentro da janela compreendida entre $t_1 = 1500$ s e $t_2 = 4000$ s para cada simulação. Os dados obtidos são mostrados na Figura 3.4, com o eixo horizontal apresentando os valores de λ e o eixo vertical a variância do sinal dentro da janela utilizada.

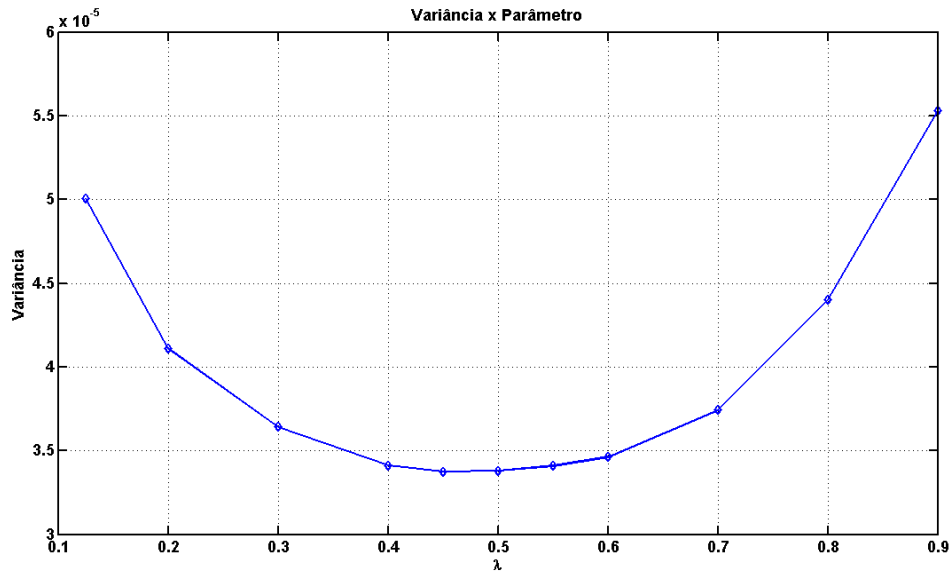


Figura 3.4: Relação entre o parâmetro λ e a variância do erro.

A Figura 3.4 mostra que há um mínimo de variância, cujo valor depende do parâmetro λ . Porém, o valor do parâmetro ótimo só é conhecido neste caso porque diversas simulações foram feitas através de um modelo da planta, o que é impraticável em situações reais. Além disso, o valor ideal do parâmetro λ pode variar, dependendo da condição de operação do sistema.

Attingir o valor ideal do parâmetro, independente da condição da planta, é o objetivo principal da camada superior de controle, que usa o parâmetro λ como variável manipulada e o valor da variância do erro como medida de desempenho. Outra característica importante é que o controlador se adapte a diferentes condições do processo.

3.4 Projeto do Controlador da Camada Superior

Com base em simulações, definiu-se o valor de 240 segundos para o tempo de amostragem da camada superior (controlador *Extremum Seeking*), conforme discutido na seção 3.1.1, o que é aproximadamente quatro vezes o tempo de subida do sistema em malha fechada. O uso de períodos maiores do que este resultou em um sinal de variância ruidoso, o que causava dificuldades de convergência para o controlador.

O diagrama de blocos utilizado no *Simulink* para o cálculo da variância do erro para o instante de amostragem j é mostrado na Figura 3.5, e representa a equação:

$$var(j) = \frac{1}{240} \sum_{k=j-240}^j (PV(k) - SP(k))^2 \quad (3.11)$$

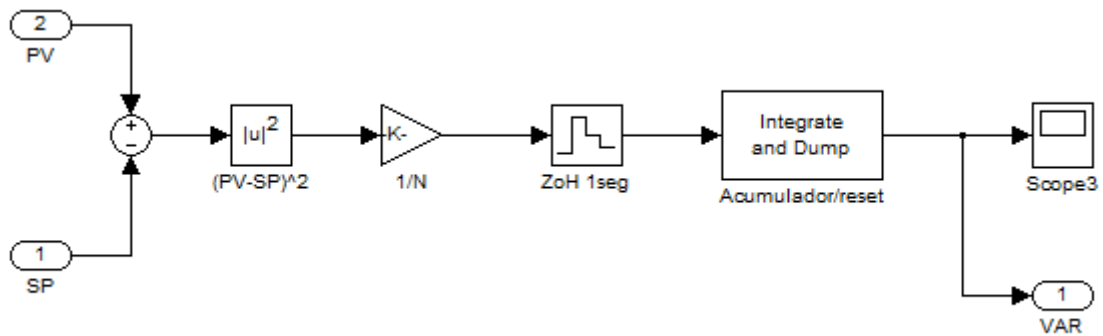


Figura 3.5: Diagrama de blocos no Simulink para o cálculo da variância.

3.4.1 Controle Extremum Seeking

Para que o sistema de controle opere com o valor do parâmetro λ que minimiza a variância, ou seja, no ponto de mínimo da curva mostrada na Figura 3.4, o método de controle *Extremum Seeking* foi utilizado. O diagrama construído no Simulink para implementar o método é baseado na estrutura apresentada na seção 3.1, e é mostrado na Figura 3.6:

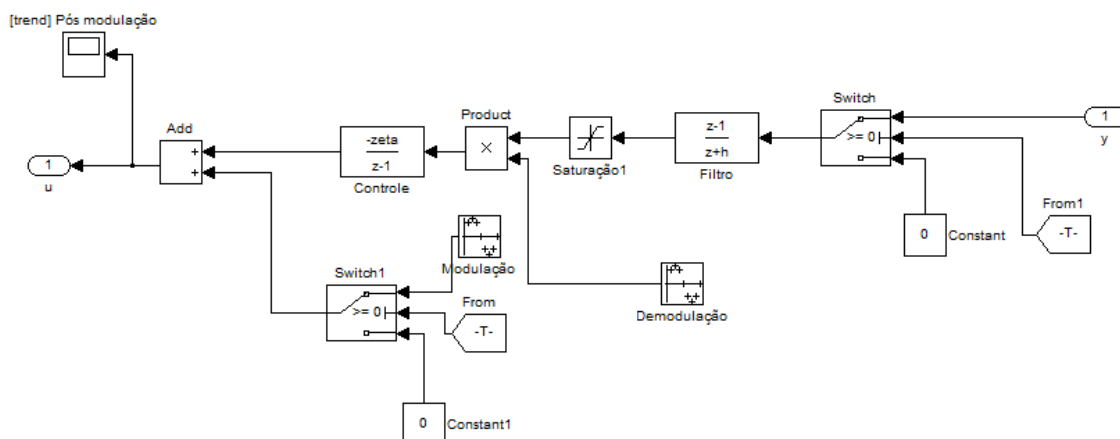


Figura 3.6: Diagrama de blocos utilizado para implementar o controle *Extremum Seeking*.

Neste diagrama, u representa o parâmetro λ somado à modulação, e y é o sinal de variância calculado pela camada inferior.

Foram adicionados dois blocos de saturação à estrutura original para um melhor resultado. O primeiro, entre o filtro passa-alta e o bloco de demodulação, foi empregado para evitar que a mudança de *set-point* em degrau, que gera um grande erro e conseqüentemente grande variância, causasse uma variação brusca na saída do controlador. O segundo foi utilizado na saída do controlador *Extremum Seeking*, para evitar que o parâmetro λ seja negativo, o que instabilizaria a malha.

Com base no período de amostragem para o cálculo da variância definido anteriormente, ensaios foram realizados para se determinar um valor da freqüência de modulação ω_1 para o parâmetro λ que resultasse em uma oscilação sustentada no sinal de variância calculado. O valor de ω_1 deve ser suficientemente grande para não coincidir com freqüências de pólos do sistema, evitando falsas leituras no sinal de variância. Assim, o valor utilizado para a freqüência

de modulação do parâmetro é de 16 amostras por ciclo, equivalente a aproximadamente 0,0016 rad/s.

Após definir o valor da frequência de modulação, a amplitude da modulação foi ajustada em 0,2 (adimensional), a fim de causar uma oscilação em regime permanente no erro com aproximadamente 0,2 cm em amplitude, seguindo o método de projeto apresentado na seção 2.4, a qual sugere uma amplitude de modulação que resulte em um pequeno erro na saída. Apesar de estes valores serem numericamente iguais, não há uma relação linear entre eles. Na Figura 3.7(a) é mostrado o parâmetro λ modulado, com a frequência ω_1 definida anteriormente. Na Figura 3.7(b) é mostrado o resultado desta modulação no sinal de variância. Observa-se que a frequência de oscilação do sinal de variância, em vermelho, é o dobro da frequência do sinal de modulação, mostrado em azul.

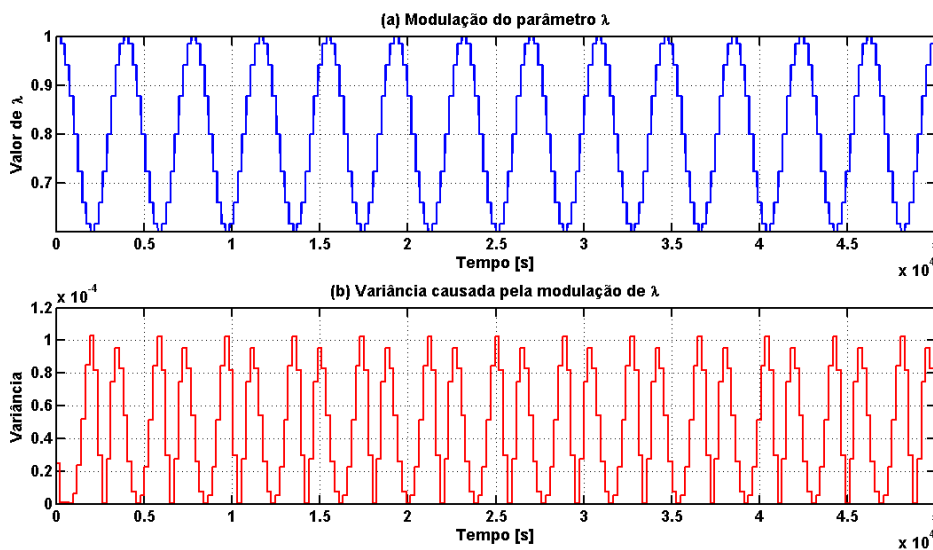


Figura 3.7: (a) Modulação do parâmetro λ e (b) o efeito causado no sinal de variância.

Com estes parâmetros definidos, é possível projetar o filtro passa-alta que faz parte da estrutura do *Extremum Seeking*. O filtro utilizado é representado pela função de transferência mostrada na equação 3.12, e o parâmetro h é usado para ajuste do filtro.

$$F_{hp}(z) = \frac{z-1}{z+h} \quad (3.12)$$

A finalidade deste filtro é apenas remover a média do sinal. Deste modo, a escolha da frequência de corte do filtro não apresenta grande impacto no desempenho do sistema, desde que esta permita a passagem da oscilação no sinal de interesse, neste caso, o sinal de variância. Logo, após alguns ensaios, o parâmetro do filtro foi ajustado em $h = 0,001$. Na Figura 3.8 é mostrado o sinal de variância antes de ser filtrado em vermelho, e após ser filtrado em azul, conforme obtido através de simulação.

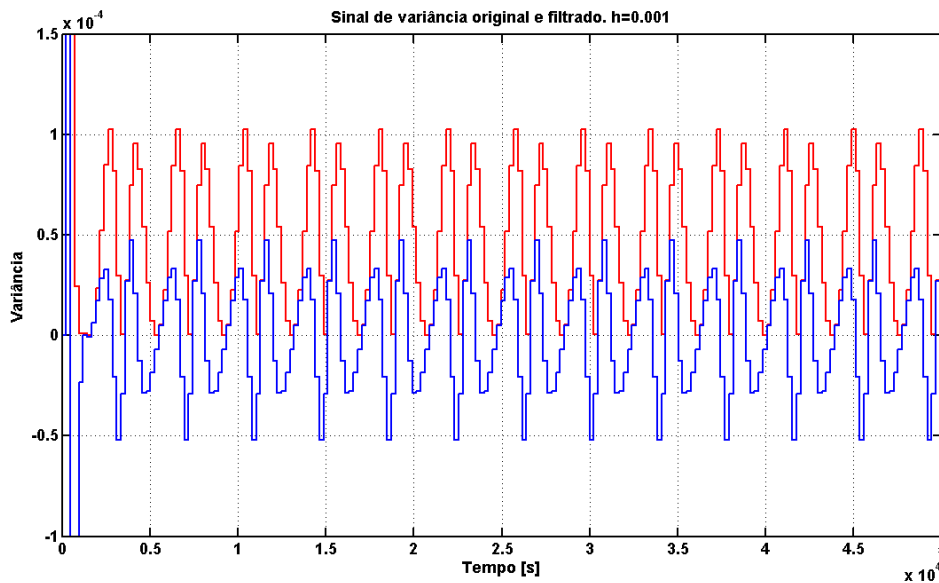


Figura 3.8: Sinal de variância modulado antes de ser filtrado, em vermelho, e após ser filtrado, em azul.

O passo seguinte é a geração do sinal de demodulação do controlador. Como mostrado anteriormente na Figura 3.7, o sinal de variância, por ter dependência quadrática do erro, tem o dobro da frequência de oscilação do sinal de modulação, além de um atraso de fase neste caso. Logo, a frequência utilizada para a demodulação é o dobro de ω_1 , ou seja, 8 amostras por período, aproximadamente 0,0032 rad/s. O atraso de fase do sinal de demodulação foi ajustado com base nos dados obtidos para estar em sincronia com o sinal de variância após este ser filtrado, e tem um valor de 5 amostras. Este parâmetro de sincronia da demodulação é muito importante, pois esse tem influência direta no desempenho do controlador *Extremum Seeking*, e deve ser ajustado com cuidado.

Na Figura 3.9(a) são mostrados dois sinais: o sinal de variância filtrado, em azul, que representa a entrada do bloco de demodulação, e o sinal de demodulação utilizado, em verde. Na Figura 3.9(b) é mostrado o resultado da demodulação, que é a multiplicação dos dois sinais da Figura 3.9(a). Em ambas as figuras somente uma janela do sinal compreendida entre $t_1 = 25000$ s e $t_2 = 50000$ s é exibida, e as amplitudes foram normalizadas para melhor visualização da sincronia.

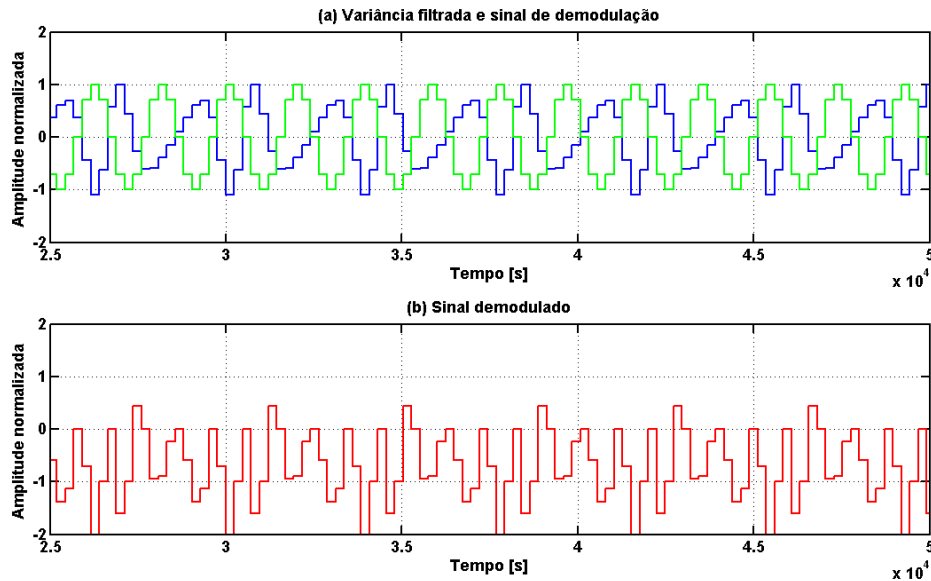


Figura 3.9: (a) Sinal de variância filtrado e o sinal de demodulação e em (b) Resultado da demodulação.

O último bloco a ser ajustado é o de controle propriamente dito, que neste caso é um integrador com ganho negativo, pois se deseja atingir o mínimo da curva de variância. Além de manter o valor do parâmetro ótimo na saída, o integrador atua como um filtro passa-baixa, que elimina as variações decorrentes da demodulação do sinal de variância. Ensaio com diferentes valores de ganho para o integrador foram feitos, e definiu-se o valor de $k = 1,5$. Para valores menores, o *Extremum Seeking* apresentou resposta muito lenta para estabilização do parâmetro, e valores maiores instabilizaram o sistema devido à grande variação do parâmetro λ entre dois períodos de amostragem da camada superior.

Após definir a estrutura e os parâmetros tanto da camada inferior quanto da camada superior, o controlador foi testado com o modelo não-linear da planta de tanque esférico. Realizaram-se ensaios para observar o desempenho e a robustez, os quais são apresentados e discutidos no capítulo 4.

4 Resultados e Discussão

Para mostrar o desempenho do controlador, simulações foram feitas com o modelo não-linear da planta de tanque esférico, com ruído branco adicionado na entrada da planta em todas as simulações, com variância de 0,0035. Adicionalmente, um ensaio foi realizado na planta real do laboratório para observar o comportamento do controlador neste caso. Os ensaios e seus resultados são mostrados a seguir.

4.1 Teste I

Neste teste, as duas camadas do controlador são postas em modo *automático*, e a estimativa inicial do parâmetro λ é menor do que o valor ideal. O objetivo é verificar se o controlador converge o parâmetro para um valor que minimize a variância, assim como seu comportamento durante o teste. Nenhuma perturbação é aplicada durante o processo. Na Figura 4.1 é mostrado o sinal da variável controlada, na Figura 4.2 é mostrada a evolução do parâmetro λ , e na Figura 4.3 é mostrado o sinal de variância. As condições usadas nesta simulação estão na Tabela 4.1.

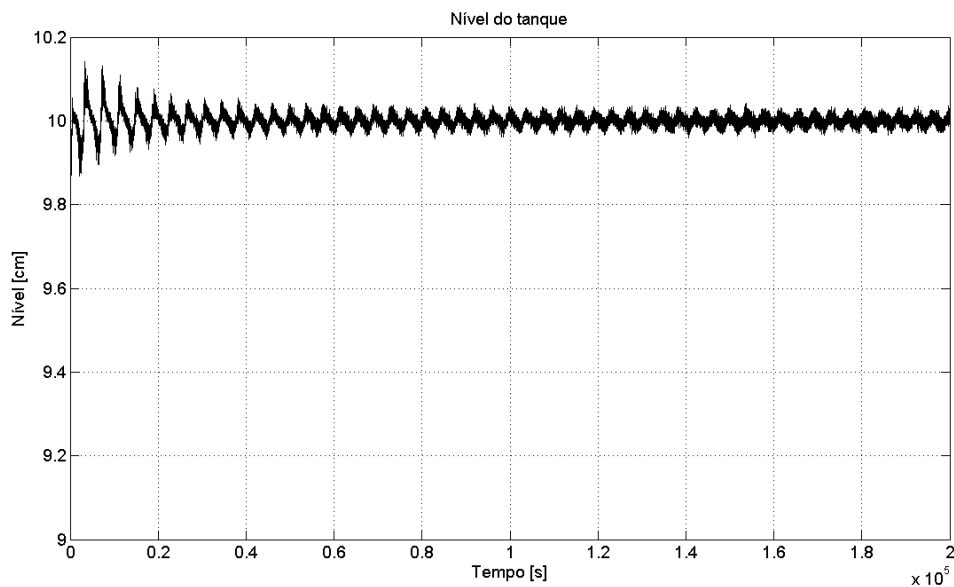


Figura 4.1: Nível do tanque (PV) no Teste I.

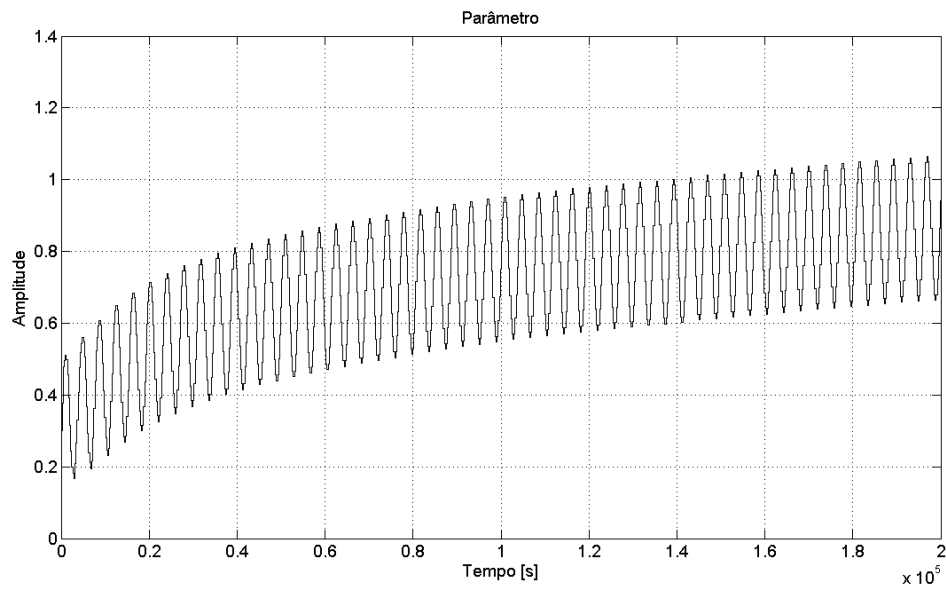


Figura 4.2: Valor do parâmetro λ no Teste I.

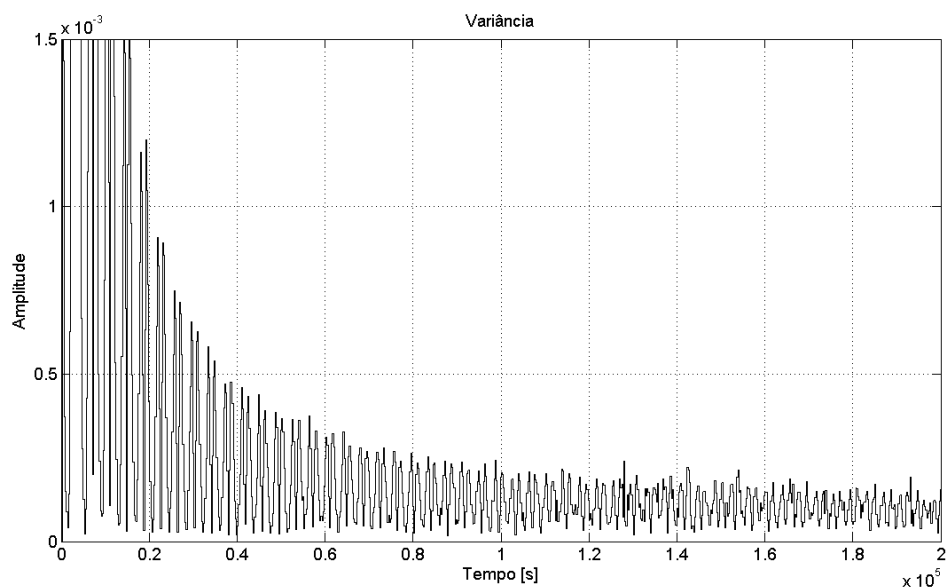


Figura 4.3: Sinal de variância no Teste I.

Tabela 4.1: Parâmetros e resultados do Teste I.

Tempo de simulação	2×10^5 s
Estimativa inicial de λ	0,3
Valor final de λ	$\approx 0,863$
Valor médio final da variância	$1,106 \times 10^{-4}$

4.2 Teste II

Nesta simulação, também com as duas camadas do controlador em modo *automático*, a estimativa inicial do parâmetro λ é maior do que o valor ideal. O objetivo é verificar se o controlador converge o parâmetro para um valor que minimize a variância. Novamente, nenhuma perturbação é aplicada durante o processo. Na Figura 4.4 é mostrado o sinal da

variável controlada, na Figura 4.5 é mostrada a evolução do parâmetro λ , e na Figura 4.6 é mostrado o sinal de variância. As condições usadas neste teste estão na Tabela 4.2.

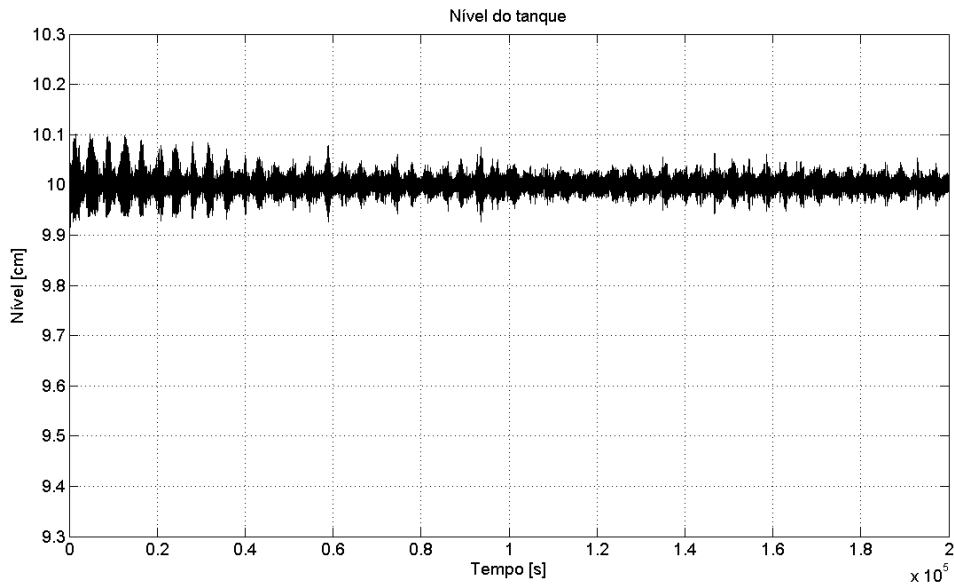


Figura 4.4: Nível do tanque (PV) no Teste II.

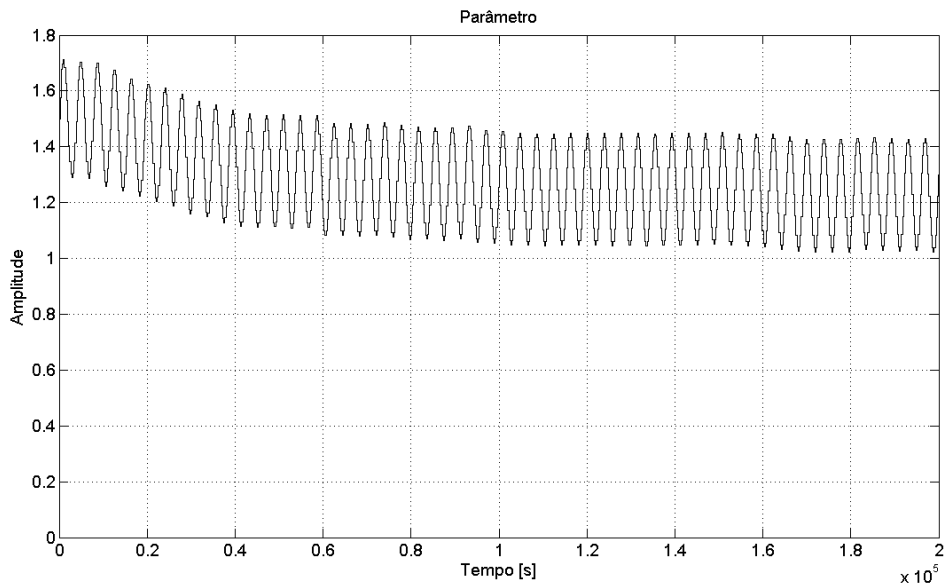


Figura 4.5: Valor do parâmetro λ no Teste II.

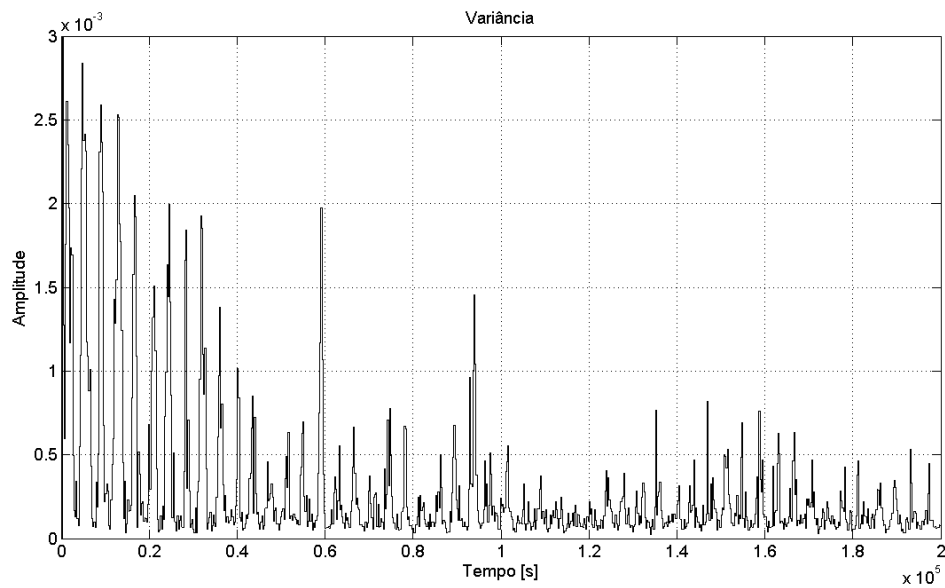


Figura 4.6: Sinal de variância no Teste II.

Tabela 4.2: Parâmetros e resultados do Teste II.

Tempo de simulação	$2 \times 10^5 \text{ s}$
Estimativa inicial de λ	1,5
Valor final de λ	$\approx 1,23$
Valor médio final da variância	$2,047 \times 10^{-4}$

Nos casos em que a estimativa inicial do parâmetro λ é maior que 1,5, o parâmetro converge para um valor que não minimiza a variância, como é mostrado na Figura 4.7(b). Nesta simulação, a estimativa inicial do parâmetro λ era 1,8, e o controle levou o parâmetro à aproximadamente 2. O nível do tanque é mostrado na Figura 4.7(a).

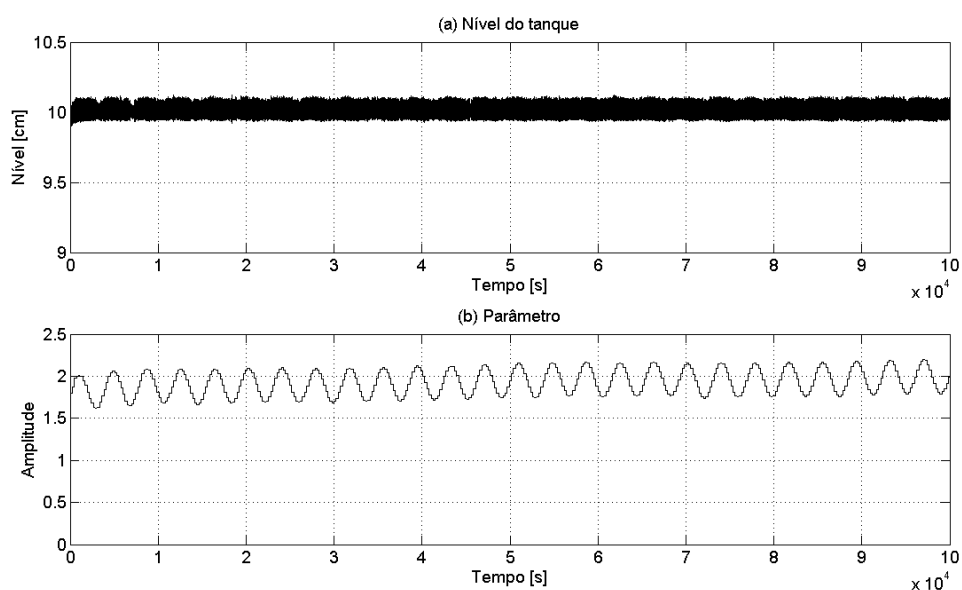


Figura 4.7: Teste em que o parâmetro não converge para o ótimo. Em (a) é mostrado o nível do tanque, e em (b) o valor do parâmetro λ .

4.3 Teste III

Neste teste, o desempenho do controlador desenvolvido é comparado ao desempenho do controlador usando somente a camada inferior, designado aqui de controlador “fixo”. As condições do teste compreenderam estabilizar o sistema no *set-point* de 10 cm, e em $t = 10000$ aplicar uma perturbação na vazão de alimentação do tanque na forma de uma onda quadrada, com período de 100 segundos, amplitude de 0,8 L/min e *duty-cycle* de 50%. A estimativa inicial do parâmetro para o *Extremum Seeking* é $\lambda = 0,6$, e o mesmo valor é usado no controlador fixo para comparação. Na Figura 4.8(a) e na Figura 4.8(b) são mostrados o nível do tanque em malha fechada com o controlador *Extremum Seeking* e com o controlador fixo.

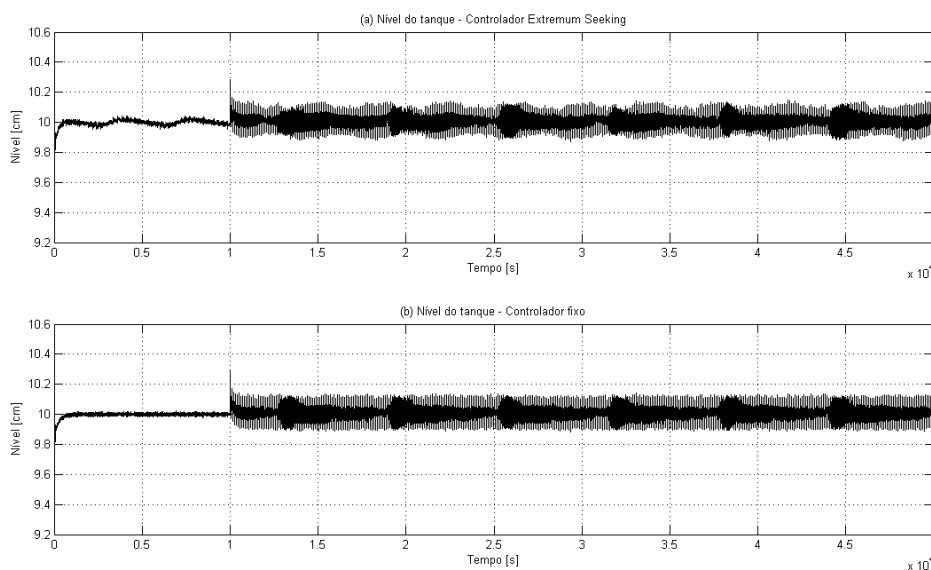


Figura 4.8: Comparação do nível do tanque entre os dois controladores. Em (a) com controlador *Extremum Seeking* (Estimativa inicial $\lambda = 0,6$), e em (b) com o controlador fixo ($\lambda = 0,6$).

Os sinais de variância obtidos neste teste são mostrados na Figura 4.9, sendo em (a) o sinal obtido com o controlador *Extremum Seeking* e em (b) com o controlador fixo.

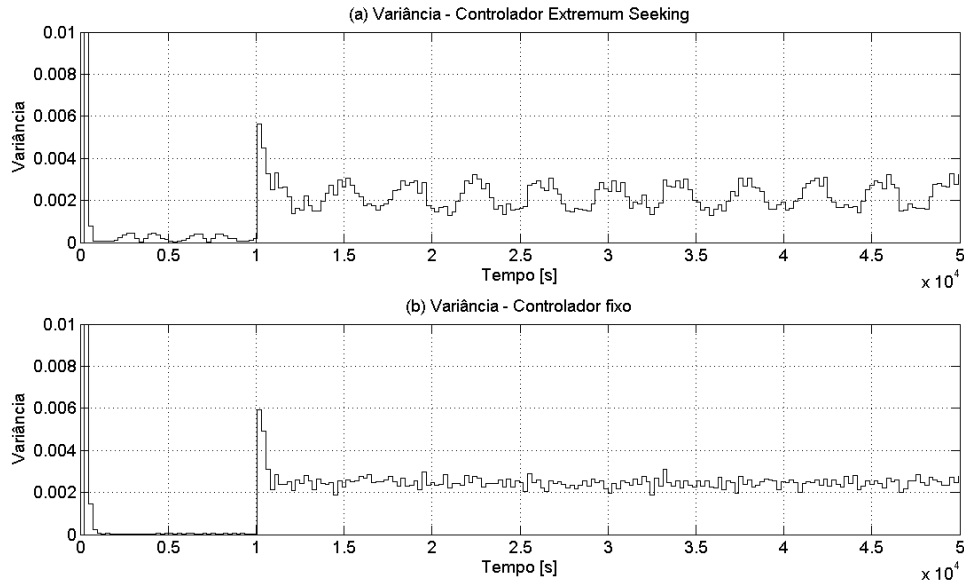


Figura 4.9: Comparação do sinal de variância entre os dois controladores. Em (a) com controlador *Extremum Seeking* (Estimativa inicial $\lambda = 0,6$), e em (b) com o controlador fixo ($\lambda = 0,6$).

A fim de se comparar as duas estruturas, uma vez que o sinal de variância é oscilatório no caso do *Extremum Seeking*, na Tabela 4.3 são apresentadas as médias da variância, calculadas a partir de $t = 25000$ para desconsiderar o regime transiente no resultado.

Tabela 4.3: Médias do sinal de variância obtidas na simulação III.

	Extremum Seeking	Controlador fixo
$\overline{\sigma^2}$	0,002222	0,002437

4.4 Ensaio na Planta Piloto

O ensaio na planta piloto foi idêntico ao realizados em simulações, porém, alguns parâmetros do controlador *Extremum Seeking* foram alterados para valores mais conservadores, evitando instabilizar a malha, uma vez que o experimento não seria assistido em função do tempo de duração ser longo. O ensaio teve duração reduzida devido a falhas de comunicação, totalizando aproximadamente 10 horas, menos da metade do tempo de simulação nos testes. Porém, o ensaio apresentou resultados interessantes, mostrados a seguir. Na Figura 4.10 é mostrado o nível do tanque, na Figura 4.11 é mostrado o valor do parâmetro λ , e na Figura 4.12 é mostrado o valor da variância durante o ensaio, com o eixo vertical truncado em $y = 0,016$ para melhor visualização. Os dados da simulação são mostrados na Tabela 4.4.

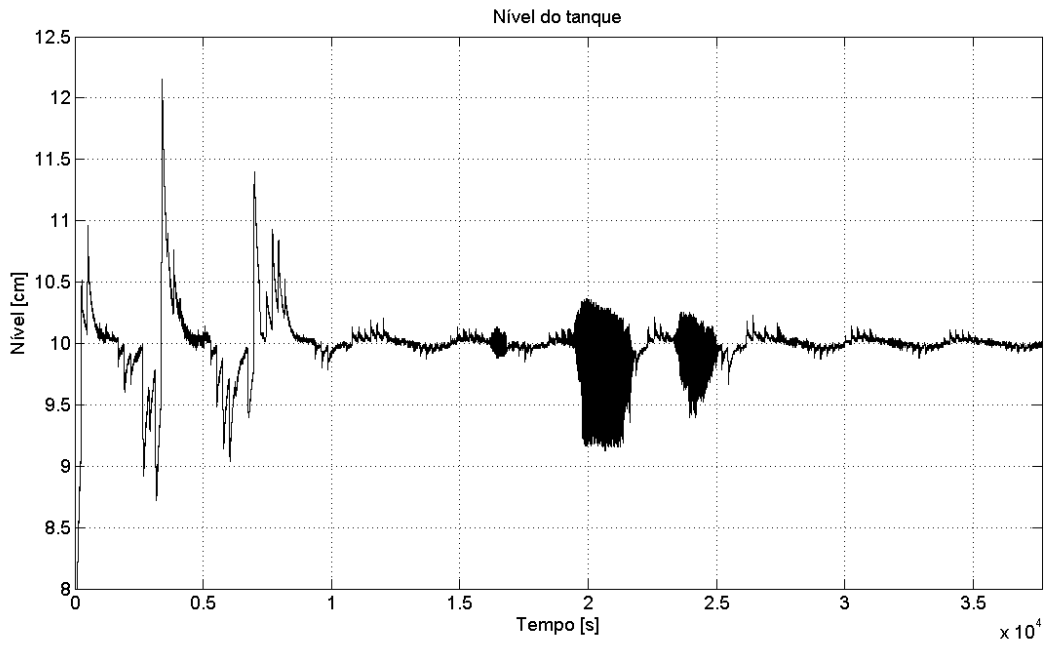


Figura 4.10: Nível do tanque (PV) no ensaio realizado na planta piloto.

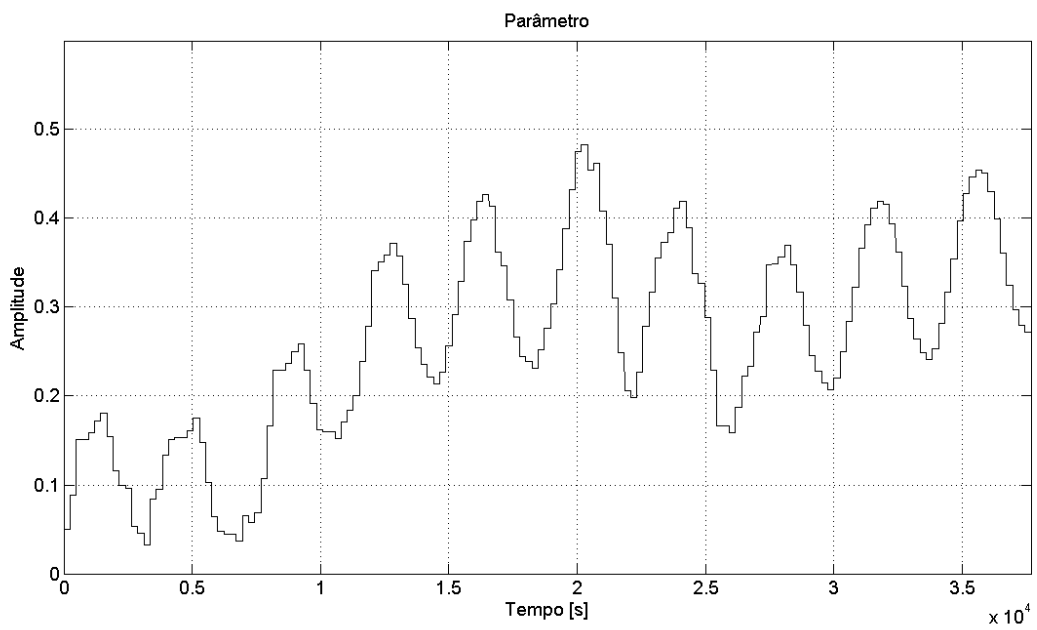


Figura 4.11: Valor do parâmetro λ no ensaio realizado na planta piloto.

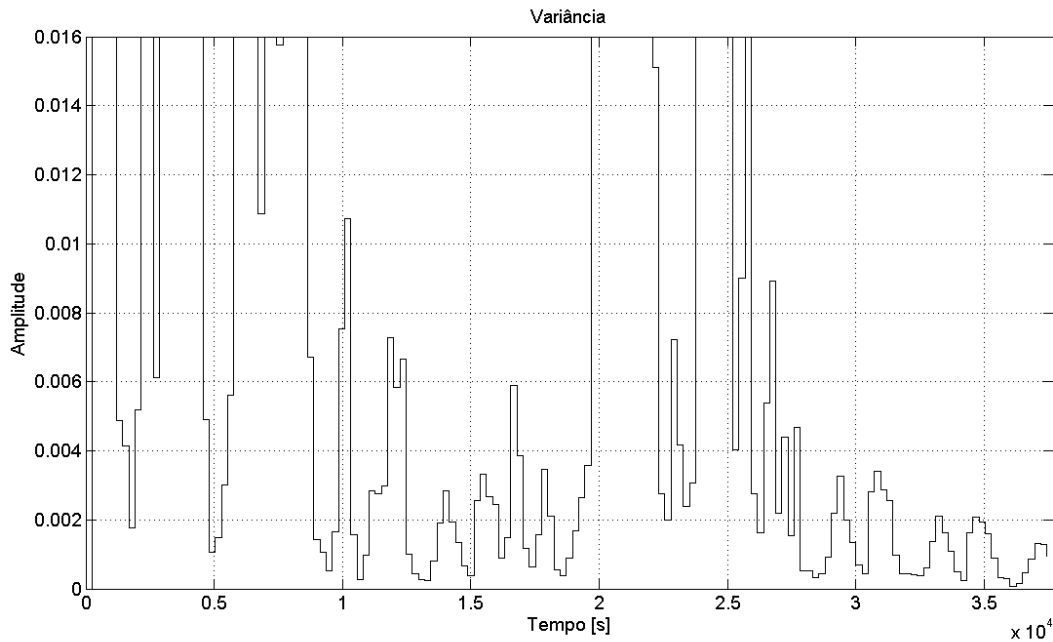


Figura 4.12: Sinal de variância no ensaio realizada na planta piloto.

Tabela 4.4: Dados e resultados do ensaio na planta piloto.

Tempo de simulação	$3,768 \times 10^4$ s
Estimativa inicial de λ	0,1
Valor final de λ	$\approx 0,35$
Ganho do controlador <i>Extremum Seeking</i>	1,3
Amplitude de modulação	0,15

4.5 Discussão

Apesar do controle *Extremum Seeking* efetivamente reduzir a variabilidade nos Testes I e II, o valor para o qual o parâmetro convergiu não era o esperado, que seria em torno de $\lambda = 0,6$ de acordo com a Figura 3.4. Além disso, apesar do tempo de simulação ser bastante longo, o parâmetro não convergiu para o mesmo valor nos dois casos, apesar de ainda apresentar tendência crescente no Teste I e decrescente no Teste II.

Para investigar o motivo deste fenômeno, uma nova sequência de ensaios foi realizada, com as mesmas características usadas para a obtenção da curva da Figura 3.4, porém, adicionando a modulação intrínseca do método *Extremum Seeking* ao parâmetro λ . A curva obtida com estes ensaios é mostrada na Figura 4.13, e apresenta diferenças em relação à curva anterior.

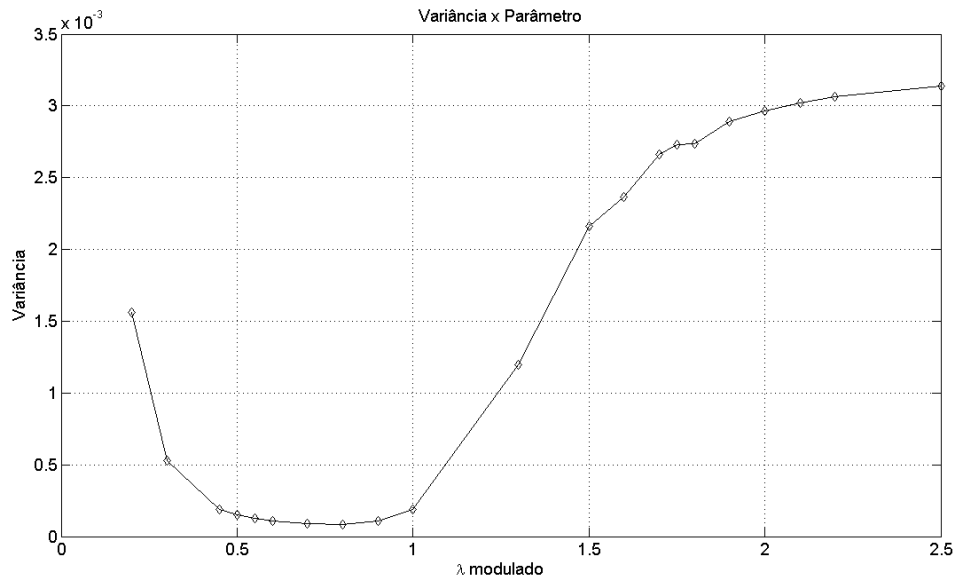


Figura 4.13: Curva obtida para a relação entre o parâmetro λ modulado e a variância.

Para observar melhor a região compreendida na faixa $1,5 \leq \lambda \leq 2$, simulações mais detalhadas foram feitas para refinamento da curva nesta região, e o resultado é mostrado na Figura 4.14.

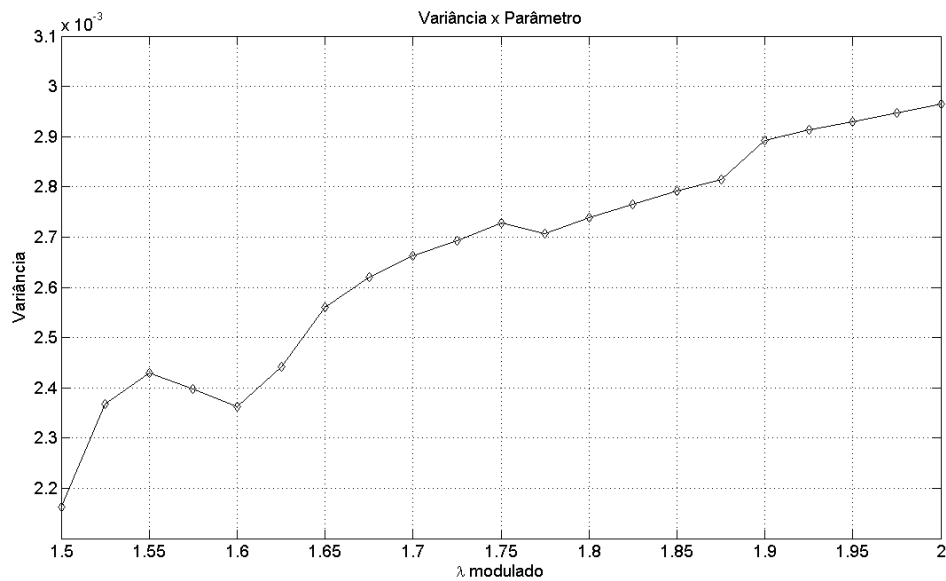


Figura 4.14: Detalhe da região de interesse da relação entre o parâmetro λ modulado e a variância.

Apesar de a curva apresentar mínimos locais, estes são muito suaves, e não deveriam ser motivo suficiente para o método convergir para tais valores. Além disso, os mínimos locais não têm os mesmos valores para os quais as simulações convergiram, porém, isto pode ser decorrência da alteração do valor de ruído branco na entrada da planta simulada, do fechamento do laço de realimentação do *Extremum Seeking* ou do número finito de amostras para o cálculo da variância do sinal de erro.

Outra característica da curva mostrada na Figura 4.13, que pode ser o motivo do parâmetro não convergir rapidamente para o valor de mínima variância, é a declividade da curva na região de mínimo, a qual é quase plana. Esta característica pode levar a uma baixa taxa de convergência do parâmetro, devido ao valor baixo de gradiente nesta região.

No Teste III, apesar dos valores médios de variância apresentarem pequena diferença entre os dois casos, basear as conclusões somente na comparação direta entre estes oculta resultados importantes deste ensaio. Apesar da variância no caso com o controlador *Extremum Seeking* ser ligeiramente menor, deve-se atentar que este controlador, em uma primeira análise, aumenta a variância em consequência da oscilação constante na saída (modulação do parâmetro), mas compensa o efeito pela otimização do parâmetro λ .

É importante destacar também que o Teste III com o controlador fixo foi realizado com $\lambda = 0,6$, valor próximo à situação de variância mínima, resultando no melhor desempenho que este controlador alcança. Para comparar os controladores em uma situação menos favorável, um novo teste foi feito.

4.5.1 Teste IV

Este teste foi realizado em condições semelhantes ao Teste III, com a mesma perturbação aplicada em $t = 25000 \text{ s}$, e com a estimativa inicial de $\lambda = 0,3$, sendo o mesmo valor usado para o controlador fixo. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 4.15 (para o nível do tanque) e na Figura 4.16 (para a variância).

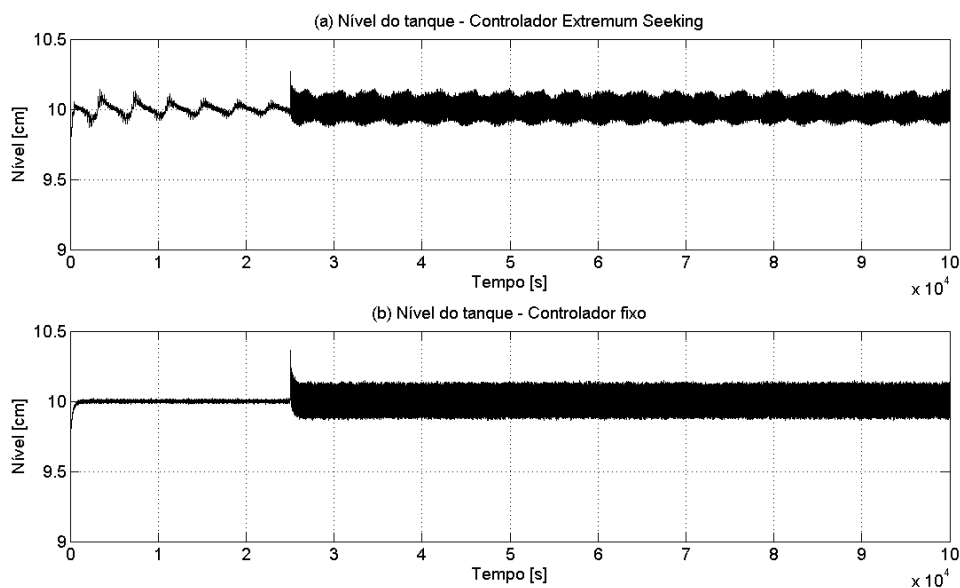


Figura 4.15: Comparação do nível do tanque entre os dois controladores. Em (a) com controlador *Extremum Seeking* (Estimativa inicial $\lambda = 0,3$), e em (b) com o controlador fixo ($\lambda=0,3$).

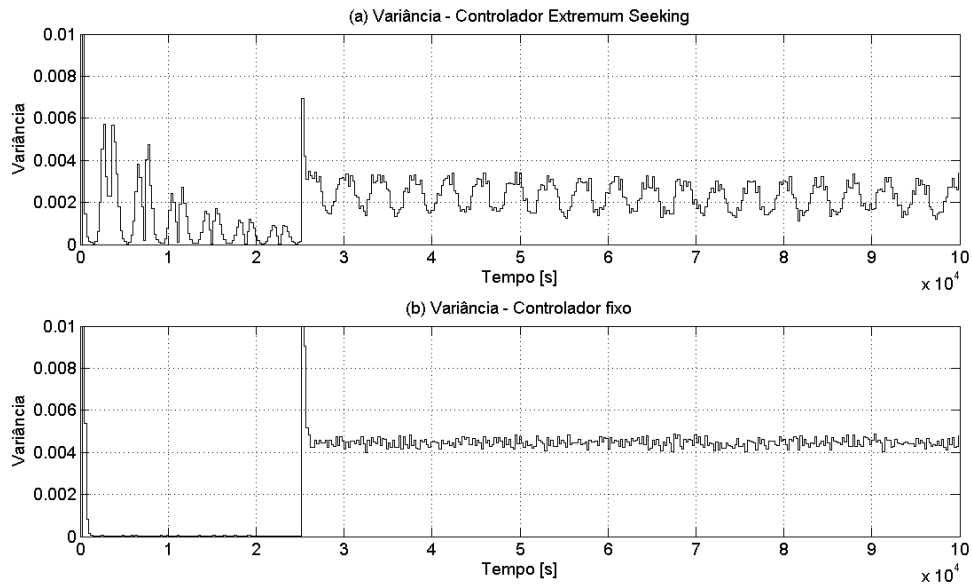


Figura 4.16: Comparação do sinal de variância entre os dois controladores. Em (a) com controlador *Extremum Seeking* (Estimativa inicial $\lambda = 0,3$), e em (b) com o controlador fixo ($\lambda = 0,3$).

O mesmo efeito no sinal de variância do Teste III é observado no Teste IV, devido à modulação do parâmetro, mas neste caso o controlador *Extremum Seeking* reduziu em aproximadamente 50% o valor médio do sinal de variância, como é mostrado na Tabela 4.5, calculados a partir de $t = 35000$ s para não incluir o efeito transiente no resultado.

Tabela 4.5: Médias do sinal de variância para o Teste IV.

	Com Extremum Seeking	Com controlador fixo
$\overline{\sigma^2}$	0,00229	0,00445

5 Conclusões

Neste trabalho, objetivando o controle auto-supervisionável de mini-unidades remotas para aplicações industriais, foi desenvolvido um controlador com arquitetura em duas camadas com o intuito de prover um controle robusto e com capacidade de se adaptar frente a mudanças nas condições de operação, deste modo, reduzindo a variabilidade no processo controlado.

O desenvolvimento do controlador e os resultados obtidos através dos ensaios mostraram que o *Extremum Seeking* é capaz de, em tempo real, reduzir a variabilidade da malha de controle interna, mesmo com alterações nas condições de operação. Porém, a redução efetiva da variabilidade só é obtida caso a estimativa inicial do parâmetro esteja contida em um domínio de convergência, que a princípio não é conhecido. Comparado a um controlador PI ajustado de forma a obter uma baixa variabilidade na saída, mas sem a possibilidade de adaptação, o controlador desenvolvido obteve resultados promissores, alcançando o objetivo proposto de reduzir a variabilidade da malha de controle.

Só foi possível atingir os objetivos propostos no trabalho devido ao uso da variância como medida de desempenho. Uma vez que esta é calculada em uma janela com um número finito de amostras que representam o comportamento do sistema, foi possível dividir a arquitetura de controlador em dois níveis hierárquicos: a camada inferior, que atua em tempo real, para estabilizar o processo e seguir referências, e a camada superior, que atua com um período de amostragem de 4 minutos, responsável pela otimização do desempenho através de um parâmetro de ajuste da malha inferior. Logo, com este período relativamente longo, torna-se possível utilizar uma rede de telecomunicação, como por exemplo, rede de telefonia celular (GPRS, 3G), ou de internet, para comunicação entre as camadas, uma vez que o valor da variância não será alterado significativamente, por exemplo, pela perda de pacotes de dados ou pela latência da conexão.

A comparação entre a estratégia de controle utilizando *Extremum Seeking* numa camada superior com uma malha de controle tradicional não é direta, pois o controle utilizado neste trabalho, devido à oscilação contínua na saída do processo, provoca o aumento da variância. No entanto, com a otimização do parâmetro λ , o controlador consegue reduzir a variabilidade da malha de controle, sobrepondo-a ao aumento causado pela oscilação contínua.

Um ponto negativo do controlador *Extremum Seeking* é a forma de projeto dos parâmetros do controlador. Apesar de ser de conhecimento que o sistema tem um mínimo/máximo ótimo para operação, os parâmetros função $f(\theta)$ não são conhecidos, além de variarem com as condições do sistema e também, como demonstrado, pelo fechamento da malha do *Extremum Seeking*. Logo, o ajuste dos parâmetros do controlador tais como frequência e amplitude da modulação, deve ser feito de forma *on-line*, o que em muitos casos não é possível. Além disso, o controlador *Extremum Seeking* mantém uma oscilação constante na saída do processo, ainda que de período elevado e de baixa amplitude.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O controlador *Extremum Seeking* se mostrou promissor para a otimização do desempenho de uma malha de controle que apresente um ponto de ótimo de operação em relação a determinados parâmetros, ponto este que pode não ser conhecido exatamente ou mudar com as condições do processo. Porém, algumas dificuldades encontradas durante o

desenvolvimento do trabalho evidenciaram a necessidade de soluções que fugiam do escopo do trabalho.

5.1.1 *Utilização de Filtro Passa-baixa*

No bloco de demodulação, o sinal obtido apresenta um valor médio, porém, com um *ripple* que dificulta a sintonização do controlador. Logo, sugere-se implementar um filtro passa-baixa entre a saída do bloco de demodulação e a entrada do bloco controlador, para então ser possível ajustar um modelo relacionando a entrada (variação no parâmetro λ) e a saída (sinal de variância), a fim de projetar um controlador com melhor desempenho. O atraso de fase causado pelo filtro não deve representar uma dificuldade, pois o sistema já é baseado em um período de amostragem grande. Porém, talvez a região de convergência do parâmetro seja reduzida.

5.1.2 *Controle com Dois Graus de Liberdade*

Ariyur *et. al* (2003) apresentam o controle *Extremum Seeking* com duas variáveis, que poderia ser aplicado aos dois parâmetros de um controlador PI: o ganho proporcional e o tempo integral, podendo levar a um desempenho melhor em condições mais severas de não linearidades estáticas. Porém, o método é descrito no domínio contínuo, sendo necessária a adaptação para o domínio discreto.

5.1.3 *Extremum Seeking como Malha Principal de Controle*

Como a variância é calculada através do erro de seguimento (SP-PV), sugere-se aplicar o controlador *Extremum Seeking* diretamente ao sinal do erro, utilizando-o como malha principal de controle. Apesar de desconsiderar uma das premissas deste trabalho, que é a separação das bases de tempo, acredita-se que o controlador possa obter bons resultados.

6 Referências

ARIYUR, K. B.; KRSTIĆ, M. (2003). **Real time optimization by extremum seeking control**. Hoboken, NJ: Wiley Interscience.

ÅSTRÖM, K. J. (1970). **Introduction to stochastic control theory**. New York,: Academic Press.

ÅSTRÖM, K. J. (1993). **Autonomous controllers**. Control Engineering Practice, v. 1, n. 2, p. 227-232.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T.; HANG, C. C.; HO, W.K. (1993). **Automatic tuning and adaptation for PID controllers - a survey**. Control Engineering Practice, v. 1, n. 4, p. 699-714.

BRAND, F. R. (2009). **Modelo de Inferência de Variabilidade: traduzindo o desempenho de malhas de controle em alteração de variabilidade**.(Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Química, UFRGS

HARRIS, T. J. (1989). **Assessment of Control Loop Performance**. Canadian Journal of Chemical Engineering, p. 856-861.

LIU, J.; PEÑA, D. M.; OHRAN, B. J.; CHRISTOFIDES, P. D.; DAVIS, J. F. (2009). **A two-tier control architecture for nonlinear process systems with continuous/asynchronous feedback**.

LIU, J.; PEÑA, D. M.; OHRAN, B. J.; CHRISTOFIDES, P. D.; DAVIS, J. F. (2008). **A two-tier architecture for networked process control**. Chemical Engineering Science, v. 63, n. 22, p. 5394-5409.

RIVERA, E. D. (1999). **Internal Model Control: A Comprehensive View**. Arizona State University, Tempe, Arizona.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. (2004). **Process dynamics and control**. 2nd. Ed Hoboken, NJ: Wiley.

WANG, Y.; LIU, T.; ZHAO, Z. (2012). **Advanced PI control with simple learning set-point design: Application on batch processes and robust stability analysis**. Chemical Engineering Science, v. 71, p. 153-165.