

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CEFET/MG

VINÍCIUS DOS REIS ALVES FERREIRA

**MODELAGEM E CONTROLE DE NÍVEL DE UMA CALDEIRA
DE VAPOR AQUATUBULAR**

ARAXÁ / MG

2013

VINÍCIUS DOS REIS ALVES FERREIRA

**MODELAGEM E CONTROLE DE NÍVEL DE UMA CALDEIRA
DE VAPOR AQUATUBULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação de Minas Gerais – CEFET/MG como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro de Automação Industrial.

Orientadora: Dra. Aline Fernanda Bianco

ARAXÁ / MG

2013

Dedico a meus pais e meu irmão,
pelo total apoio e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que têm me proporcionado.

A todos meus amigos, familiares e colegas de trabalho que de alguma forma contribuíram para essa conquista.

A todos os professores e servidores do CEFET, sem os quais, com certeza não estaria aqui hoje. E em especial à Professora Aline Fernanda Bianco pelas sábias orientações.

Não se preocupe muito com as suas dificuldades em Matemática,
posso assegurar-lhe que as minhas são ainda maiores.

Albert Einstein

RESUMO

O controle de nível de uma caldeira é o ponto mais crítico do processo de produção de vapor, sendo de suma importância para o bom funcionamento da caldeira, bem como para a operação com segurança. O nível do balão de uma caldeira sofre influência de diversas variáveis físicas e de processo, como a rápida variação da demanda de vapor (principalmente na geração de energia elétrica), a variação de vazão, pressão e temperatura da água que alimenta a caldeira, a expansão e contração (*shrink and swell*) da água no balão superior devido à variação da pressão de vapor interna, que acarreta na mudança de densidade da água, etc. Por se tratar de um processo não linear e dependente de diversas variáveis, os métodos usuais de controle tornam-se pouco eficientes. Assim, neste trabalho será discutido um método de controle mais adequado que possa ser aplicado no controle de nível de uma caldeira aquatubular. Para tal, será realizada a modelagem com o intuito de incorporar mais conhecimento do processo nos sistemas de controle. Com o modelo em mãos será possível observar a fundo as características do sistema, como controlabilidade e observabilidade, e então calcular novos controladores, objetivando encontrar o controle ótimo. Neste projeto também serão feitas simulações e comparação de ganho entre a forma de controle proposta e a usada atualmente em uma fábrica de ácido sulfúrico da região de Araxá-MG. Para a execução deste projeto, tomou-se como base pesquisa bibliográfica de materiais sobre modelagem de processos industriais e funcionamento de caldeira de vapor aquatubular, pesquisa de campo na empresa em que se encontra o sistema e, por fim, avaliou-se os resultados obtidos através de simulações.

Palavras-chave: Modelagem. Controle. Nível. Caldeira Aquatubular. Automação.

ABSTRACT

Drum level control for boiler is the most critical point of the steam production process, being very important to the boiler proper functioning and also for the safe operation. Many physical and process variables affects the drum level, like quick variations on steam demand (mainly in cases of electric energy generation), flowrate, pressure and temperature variation of feedwater and the shrink and swell phenomena. Because it is a nonlinear process and depends on many variables, usual control methods become less effective. Therefore, in this work will be discussed a more adequate method which could be applied on the water-tube boiler drum level control. For this, the boiler will be modelled to add more process knowledge in system control. After modelling, would be possible to note many other system characteristics, like controlability and observability, and then, calculate a new controller type, trying to get optimal control. In this work also will be make simulations and a comparison of gain between the proposed and the present controller used in a sulfuric acid factory located in Araxá-MG region. This work was based on modelling and boiler control literature, field research at the factory and on the results obtained from simulations.

Keywords: Modeling. Control. Level. Water-tube boiler. Automation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Modelo simplificado de uma caldeira aquatubular	20
FIGURA 02 – Esquema simplificado de uma caldeira aquatubular	23
FIGURA 03 – <i>Riser</i> com fluxo de calor uniforme.....	25
FIGURA 04 – Sistema de controle em malha fechada.....	40
FIGURA 05 – Sistema de controle em malha aberta	40
FIGURA 06 – Sistema de controle por antecipação – <i>feedforward</i>	41
FIGURA 07 – Sistema estável / sistema instável	43
FIGURA 08 – Entradas com degrau no fornecimento de água	48
FIGURA 09 – Comportamento das variáveis de estado para distúrbio no fornecimento de água	49
FIGURA 10 – Comportamento do nível de água para distúrbio em q_f	49
FIGURA 11 – Entradas com degrau na vazão de vapor	50
FIGURA 12 – Comportamento das variáveis de estado para distúrbio no demanda de vapor	50
FIGURA 13 – Comportamento do nível de água para distúrbio em q_s	51
FIGURA 14 – Entradas com degrau no fornecimento de calor	52
FIGURA 15 – Comportamento das variáveis de estado para distúrbio no fornecimento de calor	52
FIGURA 16 – Comportamento do nível de água para distúrbio em Q	53
FIGURA 17 – Estratégia de controle de nível a três elementos	57
FIGURA 18 – Diagrama de blocos – controlador PID cascata com <i>feedforward</i>	58
FIGURA 19 – Sistema regulador ótimo – Fonte: OGATA (2003)	61
FIGURA 20 – Diagrama de blocos – controlador LQR	65
FIGURA 21 – Entradas – simulação sem distúrbio	69
FIGURA 22 – Variáveis de estados – simulação sem distúrbio	70
FIGURA 23 – Variação de nível no tubulão – simulação sem distúrbio	70
FIGURA 24 – Entradas – distúrbio na alimentação de água em regime permanente	71

FIGURA 25 – Variáveis de estados – distúrbio na alimentação de água em regime permanente	72
FIGURA 26 – Variação de nível no tubulão – distúrbio na alimentação de água em regime permanente	73
FIGURA 27 – Entradas – distúrbio na vazão de vapor em regime permanente.....	74
FIGURA 28 – Variáveis de estados – distúrbio na vazão de vapor em regime permanente	74
FIGURA 29 – Variação de nível no tubulão – distúrbio na vazão de vapor em regime permanente	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Parâmetros físicos e de construção da caldeira.....	32
Tabela 02 – Dados estipulados ou de origem operacional.....	32
Tabela 03 – Propriedades da água e do vapor saturado	33
Tabela 04 – Valores para as condições iniciais.....	35
Tabela 05 – Parâmetros do controlador PID cascata com <i>feedforward</i>	59
Tabela 06 – Condições iniciais – simulação sem distúrbio	68

LISTA DE SÍMBOLOS

α_r	qualidade do vapor
α_m	temperatura do metal ($^{\circ}C$)
α_v	fração volumétrica do vapor
$\bar{\alpha}_v$	fração volumétrica média do vapor;
β	parâmetro empírico definido em Åström e Bell (2000);
ρ_s	massa específica do vapor (kg/m^3);
ρ_w	massa específica da água (kg/m^3);
A_{dc}	área dos downcomers (m^2);
A_d	área do tubo de vapor (m^2);
C_p	calor específico do metal ($J/(kg^{\circ}C)$);
g	constante de aceleração gravitacional ($g = 9,81m/s^2$);
h_c	entalpia de condensação (J/kg);
h_f	entalpia específica da água de alimentação (J/kg);
h_s	entalpia específica do vapor (J/kg);
h_w	entalpia específica da água (J/kg);
k	coeficiente de atrito;
l	nível da água no balão superior (m);
l_s	variação do nível da água no balão superior devido ao vapor (m);
l_w	variação do nível da água no balão superior devido à água (m);
m_d	massa total de metal do balão (Kg);
m_t	massa total do metal (kg);
p	pressão do tubo (Pa);
Q	fluxo de calor (W);
q_{cd}	vazão de condensação (Kg/s);
q_{dc}	vazão dos downcomers (Kg/s);
q_f	fluxo mássico de água que entra no tubo (kg/s);
q_r	vazão dos risers (Kg/s);
q_s	fluxo mássico de vapor que sai do tubo (kg/s);

- q_{sd} vazão de vapor que atravessa o nível de água do balão (Kg/s);
- t_m temperatura do metal ($^{\circ}C$);
- T_d tempo de residência do vapor no tubo (s);
- t_s temperatura do vapor ($^{\circ}C$);
- u_s energia interna específica do vapor (J/kg);
- u_w energia interna específica da água (J/kg);
- V_r volume dos risers (m^3);
- V_{sd} volume de vapor abaixo do nível de água do tubo de vapor (m^3);
- V_{sd}^0 volume de vapor no tubo na situação hipotética quando não há condensação de vapor (m^3);
- V_{st} volume total de vapor no sistema (m^3);
- V_t volume total de água no sistema (m^3);
- V_{wd} volume de água abaixo do nível do tubo de vapor (m^3);
- V_{wt} volume total de água no sistema (m^3);

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. ESTADO DA ARTE	18
2.1. Caldeiras aquatubulares	18
2.1.1. Componentes.....	19
2.1.2. Funcionamento	20
2.2. Gases de Combustão	21
3. MODELAGEM	22
3.1. Balanço global de massa e energia	22
3.2. Distribuição do vapor nos <i>risers</i> e balão.....	25
3.3. Modelo não linear	27
3.4. Linearização	29
3.5. Parâmetros	31
4. TEORIA DE CONTROLE MODERNO.....	36
4.1. Espaço de estados	37
4.2. Sistemas de controle.....	39
4.3. Propriedades do sistema	41
4.3.1. Controlabilidade	41
4.3.2. Observabilidade.....	42

4.3.3. Estabilidade.....	43
4.3.4. Estabilizabilidade.....	44
4.3.5. Detectabilidade	45
5. ANÁLISE E SIMULAÇÕES DO MODELO	46
5.1. Simulações.....	46
5.1.1. Distúrbio no fornecimento de água.....	48
5.1.2. Distúrbio na vazão de vapor	50
5.1.3. Distúrbio no fornecimento de calor	51
5.2. Análise do sistema	53
6. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE E SIMULAÇÕES.....	55
6.1. Controle PID cascata com <i>feedforward</i>	56
6.2. Regulador linear quadrático	60
6.2.1. LQR com matriz de estados aumentada.....	63
6.2.2. Sintonia do LQR.....	65
6.3. SIMULAÇÕES	67
6.3.1. Simulação – regime permanente.....	68
6.3.2. Simulação – distúrbio na água de alimentação em regime permanente	71
6.3.3. Simulação – distúrbio na vazão de vapor em regime permanente	73
7. CONCLUSÕES.....	76
REFERÊNCIAS.....	77

1. INTRODUÇÃO

Caldeiras de vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica. Utilizando diversas fontes de energia, a caldeira é um dos principais equipamentos do ambiente industrial, sendo amplamente utilizada na indústria química, alimentar, têxtil etc., além de sua utilização na produção de energia. O vapor gerado por ela é utilizado para acionar turbogeradores, aquecer produtos, esterilizar equipamentos, dentre outras aplicações.

O controle de nível de uma caldeira é o ponto mais crítico do processo de produção de vapor, sendo de suma importância para o bom funcionamento da caldeira, bem como para a operação com segurança.

O nível deve ser controlado entre os limites especificados no manual do fabricante da caldeira, de forma que, se o nível extrapolar o limite máximo pode haver arrastamento de gotículas de água para o superaquecedor ou para as turbinas, o que danifica os equipamentos, gera onerosos custos de manutenção e afeta a disponibilidade operacional dos mesmos. Por outro lado, caso o nível seja inferior ao limite mínimo estabelecido, pode ocorrer o superaquecimento dos tubos da parede de água que alimenta o balão superior, causando a ruptura dos mesmos, podendo acarretar, ainda, em explosão e sérios acidentes (GILMAN, 2007).

Ressaltando ainda a importância do controle de nível do balão de uma caldeira aquatubular, em Parry, Petetrot e Vivier (1995) afirma-se que cerca de 30% das paradas de emergências em usinas termoelétricas francesas são causadas devido a problemas no controle de nível.

Um modelo matemático pode ser apresentado como uma representação de um sistema real, o que significa que um modelo deve representar um sistema e a forma como ocorrem modificações no mesmo (SODRÉ, 2007).

Assim, podemos dizer que o objetivo mais importante de um modelo é que ele permita entender o sistema de uma maneira simplificada ou então descrevê-lo de um jeito mais completo, de forma que o modelamento possa ser o mais próximo possível do real.

Quando se deseja modelar um determinado sistema, deve-se levar em consideração que o mesmo é dinâmico, ou seja, encontra-se em constante alteração, movimento ou variação. Para tal, devem-se analisar as características dinâmicas e formular um conjunto de equações que represente o sistema com maior precisão.

Em Dorf (2001) definem-se Sistemas Dinâmicos por aqueles em que o valor da saída, em um determinado instante de tempo, depende de valores passados e presentes da entrada. São descritos por Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) que podem ser reescritas por meio de modelos denominados Função de Transferência e Espaço de Estados.

A maior dificuldade encontrada no controle de nível do balão de uma caldeira, é que o nível sofre influência de diversas variáveis físicas e de processo, como a rápida variação da demanda de vapor (principalmente na geração de energia elétrica), a variação de vazão, pressão e temperatura da água que alimenta a caldeira (MARQUES, 2005), a contração e expansão (*shrink and swell*) da água no balão superior devido à variação da pressão de vapor interna, que acarreta a mudança de densidade da água (GILMAN, 2007) etc.

Por se tratar de um processo não linear e dependente de diversas variáveis, os métodos usuais de controle tornam-se pouco eficientes. Hoje, existem muitos modelos matemáticos que buscam representar o comportamento dinâmico de uma caldeira aquatubular; entretanto, a falta de bons modelos de processo não linear é um gargalo na aplicação de controladores baseados em modelo.

Neste trabalho, serão analisadas outras formas de controle, bem como alternativas de obtenção de um controlador a fim de otimizar o controle de nível da caldeira aquatubular responsável por alimentar dois turbogeradores em uma fábrica de ácido sulfúrico da região de Araxá-MG.

Uma maneira de conseguir melhorar esse controle é incorporar mais conhecimento do processo nos sistemas de controle. Para tal, será realizada a modelagem com base no modelo proposto em Åström e Bell (2000), fundamentado em princípios físicos, sendo a maioria de seus parâmetros é determinada por dados de construção da caldeira.

Além de alguns dados de construção da caldeira, tais como o volume total e o peso do metal, e algumas características físicas como a pressão de operação e a temperatura do vapor a serem utilizados na modelagem, será realizado também um levantamento de dados históricos acerca dos principais problemas que causam o mau funcionamento da caldeira com o controle atual.

Com o modelo matemático em mãos, será possível observar a fundo as principais características do sistema, como a controlabilidade e a observabilidade, que auxiliará na busca de uma forma de controle mais adequada ao sistema e de estimação de parâmetros não medidos diretamente, respectivamente.

Conhecendo-se seu funcionamento, um novo controlador poderá ser calculado, aplicando algumas técnicas avançadas de controle robusto e teoria de sistemas de controle, objetivando encontrar um controle ótimo.

Como o modelo é de caráter não linear, será necessário ainda realizar a linearização do mesmo, obtendo-se um novo modelo simplificado no espaço de estados. Então, algumas simulações serão realizadas entre ambos os modelos e suas respectivas respostas em malha aberta.

Pode-se destacar que serão efetuadas simulações tanto com o controlador calculado quanto com o presente no atual sistema de controle de nível. As simulações contarão com distúrbios encontrados na planta real, com o intuito de realçar as deficiências do atual controle de nível e comparar as diferentes estratégias de controle adotadas, garantindo robustez de desempenho.

Estas simulações serão de suma importância para a avaliação dos resultados do trabalho, além de agregar conhecimento acerca do funcionamento de uma caldeira e seu comportamento em diversas situações.

2. ESTADO DA ARTE

Modelagem e sistema de controle de caldeiras têm sido objetos de estudo de diversos trabalhos nos últimos anos. Em Abdenonour (2000), Liu, Lara-Rosano e Chan (2005) e Valle e Dieck-Assad (2000) modelos e controladores utilizando lógica fuzzy foram considerados visando melhorar o desempenho das caldeiras, obtendo-se resultados altamente satisfatórios. Já em Xu, Li e Cai (2005) um Controlador Preditivo Generalizado (GPC) em cascata para controle de nível foi proposto e comparado ao controlador tradicional PID (Proporcional Integral Derivativo), obtendo-se um resultado superior a esta técnica altamente difundida e utilizada na indústria. Essa mesma comparação também foi realizada em Marques (2005), onde se efetuou o emprego dos Algoritmos Genéticos (AG), gerando também um melhor resultado.

Em Franco Jr. (2012) projetou-se um controlador através do uso de LMIs (Desigualdades Matriciais Lineares) comparando-se o modelo linear e não linear da planta com a presença de distúrbios. Outras referências que utilizam a técnica LMIs são Swarnakar, Marquez e Chen (2007) e Roshadel et al. (2011). Já os controladores robustos também podem ser encontrados em Labibi, Marquez e Chen (2009), Moradi e Bakhtiari-Nejad (2011) que têm a garantia de bom desempenho na presença de incertezas do modelo.

2.1. Caldeiras aquatubulares

Existem diversos tipos de caldeiras: aquatubulares, flamotubulares, de leito fluidizado, elétricas, chain-grates etc., sendo a primeira a mais utilizada na produção de vapor. Seu funcionamento caracteriza-se por a água a ser aquecida passar no interior de tubos que, por sua vez, são envolvidos pelos gases de combustão.

Destaca-se entre suas vantagens: a possibilidade de utilização de temperaturas superiores a 450°C e pressões acima de 60kgf/cm², a maior taxa de produção de vapor por unidade de área de troca de calor, a partida rápida em razão do volume reduzido de

água nos tubos e a vida útil deste equipamento que pode chegar a trinta anos (GONÇALVES, 2003).

2.1.1. Componentes

A seguir definiremos os principais componentes que compõem uma caldeira aquatubular segundo Silva e Pereira (1993):

- Câmara de combustão: onde se dá a queima do combustível;
- Tubulão de vapor (balão): onde a água e vapor estão em equilíbrio na temperatura de saturação correspondente à pressão do mesmo;
- Tubulão de água: reservatório d'água;
- Tubos de circulação ascendentes (*risers*): tubos que interligam os tambores de vapor e de água responsáveis por gerar e conduzir o vapor ao tubulão de vapor;
- Tubos de circulação descendentes (*downcomers*): tubos que interligam os tambores de vapor e de água, conduzindo a água ao tubulão de água;
- Isolamento e refratários: elementos que isolam a câmara de combustão, evitando perdas de calor para o exterior e protegendo a carcaça metálica;
- Estrutura e carcaça metálica: envolve a caldeira, sustenta o isolamento, os refratários e todos os internos, garantindo a estanqueidade;
- Saída de gases e chaminés: responsável pela exaustão de gases de combustão;
- Superaquecedor: componente destinado a elevar a temperatura do vapor saturado sem aumentar sua pressão, integrais ou independentes, de radiação ou convecção;
- Economizador: absorve calor dos gases de combustão para aquecer a água de alimentação;
- Pré-aquecedor de ar: aproveita calor de gases de combustão para aquecer o ar necessário para a queima;
- Soprador de fuligem: retira a fuligem acumulada nos tubos por jatos de vapor;

- Internos do tubulão de vapor: retiram umidade do vapor. Separadores de vapor de chapas corrugadas ou ciclones.

Tais componentes se fazem presentes na maioria das caldeiras aquatubulares, entretanto alguns são opcionais ou podem ser encontrados em números diferentes dependendo das características da mesma.

2.1.2. Funcionamento

Na FIG. 01 temos o modelo simplificado de uma caldeira aquatubular de circulação natural. Como podemos ver, este modelo é composto apenas pelos tubulões, superior (vapor) e inferior (água), e tubos ascendentes (*risers*) e descendentes (*downcomers*), além da fornalha.

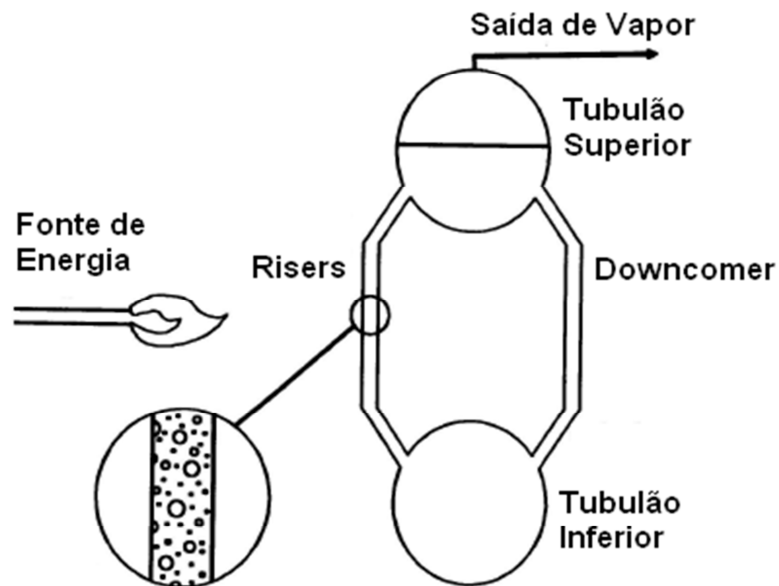


Figura 01 – Modelo simplificado de uma caldeira aquatubular

O tubulão superior opera com o nível de água dentro dos limites estipulados pelo fabricante da caldeira, geralmente em torno de 50%, enquanto o tubulão inferior trabalha totalmente afogado. Os *risers* estão próximos à fonte de energia, de forma a absorver a maior quantidade de calor proveniente dos gases de combustão. Já os tubos descendentes encontram-se em posição oposta à fonte de energia, não recebendo parcela significativa de calor.

No detalhe da figura é possível ver ainda a formação de bolhas de vapor nos tubos ascendentes devido ao aquecimento e ebulição da água. E, por esse motivo, tem-se a diminuição da massa específica do fluido, que provoca um diferencial de pressão hidrostática entre estes e os tubos descendentes, gerando um fluxo do lado descendente para o ascendente. Este fenômeno físico resultará na circulação de água, permitindo o fluxo mássico do vapor para o tubulão superior e de água nos tubos descendentes para o tubulão inferior.

O vapor gerado é liberado para o sistema através de uma tomada de vapor localizada na parte superior do balão da caldeira.

2.2. Gases de Combustão

Gases de combustão são os gases resultantes da queima de algum combustível e são responsáveis pelo aquecimento da água nos *risers*. Neste caso, o combustível é o enxofre e os gases de combustão são formados por SO_2 (dióxido de enxofre) e Ar.

O principal método de produção de ácido sulfúrico utilizado, atualmente, se dá através do processo de contato, utilizando o enxofre como matéria prima para obtenção de SO_2 . Nesse processo, o enxofre sofre combustão liberando uma grande quantidade de calor, que é utilizado na geração de vapor.

Esta reação ocorre em uma câmara, onde o enxofre é vaporizado pelo próprio calor da combustão. No estado gasoso, o enxofre reage com ar, elevando a temperatura do meio reacional a 1 000°C, aproximadamente.

3. MODELAGEM

Com o passar do tempo, os sistemas de engenharia vêm se desenvolvendo a cada dia, fazendo com que mais variáveis tenham que ser controladas, buscando maior produção, qualidade e, por via de consequência, melhor precisão dos sistemas.

Para se alcançar precisão nos sistemas de controle automático é necessário um controle exato, sem erros, com um modelamento matemático mais complexo e preciso, o que é difícil de se obter na prática. Para atender a um mercado mais exigente, onde há sistemas de controle de várias entradas e saídas modelados de forma mais completa é necessário um modelo no espaço de estados, que se refere à teoria de controle moderno, baseado no conceito de variáveis de estado.

Na literatura existem diversos modelos que buscam representar o funcionamento dinâmico de uma caldeira, dentre os quais destacamos um em especial: Åström e Bell (2000), muito utilizado por estudiosos e pesquisadores em simulações computacionais. O referido artigo não aborda detalhadamente alguns pontos, como por exemplo, a utilização da tabela de vapor saturado e as aproximações do sistema, que serão tratados neste capítulo.

3.1. Balanço global de massa e energia

Devido à complexidade do processo de geração de vapor, o modelo é calculado realizando-se balanços de massa, energia e quantidade de movimento, bem como algumas simplificações que facilitam os cálculos e praticamente não influenciam na capacidade de o modelo simular o sistema real.

Conforme demonstrado na FIG. 02, a água pré-aquecida entra pelo tubulão de vapor a uma vazão q_f . A água, que ainda se encontra em estado líquido, desce pelos tubos *downcomers* a uma vazão q_{dc} até o tubulão inferior, em seguida sobe pelos *risers* (tubos de subida) a uma vazão q_r onde recebe certa quantidade de calor Q proveniente dos gases de combustão.

Então, é nos tubos de subida que a água passa pelo processo de evaporação, chegando ao tubulão superior uma mistura de água e vapor. O vapor por sua vez, sai do tubulão a uma vazão q_s . O tubulão de vapor, além de vapor, possui também água saturada, cujo nível (l) é medido da parte inferior à superfície do líquido.

Dessa forma, temos o balanço global de massa dado pela seguinte equação:

$$q_f - q_s = \frac{d}{dt}(\rho_s V_{st} + \rho_w V_{wt}) \quad (1)$$

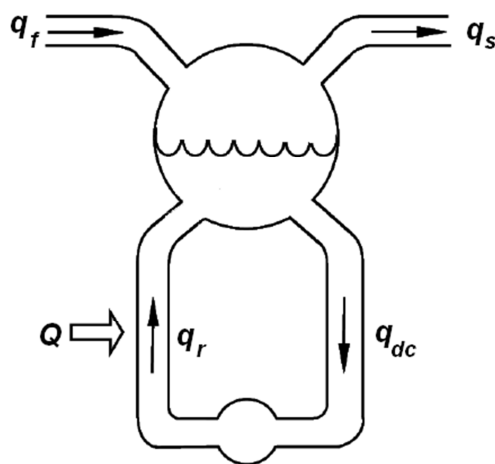


Figura 02 – Esquema simplificado de uma caldeira aquatubular

Abaixo segue o balanço global de energia:

$$Q + q_f h_f - q_s h_s = \frac{d}{dt}(\rho_s u_s V_{st} + \rho_w u_w V_{wt} + m_t C_p t_m) \quad (2)$$

sendo

$$V_t = V_{st} + V_{wt}$$

$$u = h - \frac{p}{\rho} \quad (3)$$

Aplicando as equações (3) em (2), tem-se que:

$$Q + q_f h_f - q_s h_s = \frac{d}{dt}(\rho_s u_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} - p V_t + m_t C_p t_m) \quad (4)$$

Utilizando as equações (1) e (4), um sistema de segunda ordem é obtido, responsável pela dinâmica dos balanços de massa e de energia. Selecionando-se como variáveis de estado a pressão p , e o volume total de água V_{wt} . Com algumas manipulações algébricas, obtém-se:

$$(\rho_w - \rho_s) \frac{dV_{wt}}{dt} + \left(V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \right) \frac{dp}{dt} = q_f - q_s \quad (5)$$

Fazendo

$$\begin{cases} e_{11} = \rho_w - \rho_s \\ e_{12} = V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \end{cases} \quad (6)$$

é obtida a seguinte equação:

$$e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s \quad (7)$$

De maneira análoga, serão aplicados à Equação (4), os termos do sistema abaixo (8):

$$\begin{cases} e_{21} = \rho_w h_w - \rho_s h_s \\ e_{22} = V_{wt} \left(h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) + V_{st} \left(h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \end{cases} \quad (8)$$

chegando a:

$$e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s \quad (9)$$

As equações (7) e (9) retratam a quantidade total de água e o comportamento da pressão no sistema, entretanto não demonstram a variação do nível, muito menos os efeitos de expansão e contração, considerados no próximo tópico.

3.2. Distribuição do vapor nos risers e balão

Para se obter a melhor aproximação possível, é necessário considerar os parâmetros de contração e expansão (*shrink and swell*) da água no tubulão superior devido à redistribuição de água e vapor no sistema e à variação da pressão interna. Este fenômeno influi diretamente no nível de água do balão, uma vez que o nível sobe quando há um aumento na demanda de vapor, pois este leva ao decaimento da pressão interna do tubulão, causando uma expansão das bolhas de vapor abaixo da superfície de água (KWATNY & BERG, 1993).

A FIG. 03 ilustra um tubo de subida de comprimento z , área A e volume V , onde ocorre a ebulição da água.

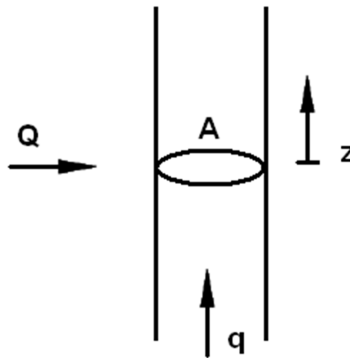


Figura 03 – Riser com fluxo de calor uniforme

Considerando α_m a fração mássica de vapor ao longo do tubo de subida, ou seja, a qualidade da mistura de água-vapor; α_r a qualidade de vapor na saída dos risers; ξ o comprimento normalizado do tubo; e sabendo que a massa e o volume são constantes em relação ao tempo, tem-se que:

$$\alpha_m = \frac{QAz}{qh_cV}$$

$$h_c = h_s - h_w$$

$$\alpha_m(\xi) = \alpha_r(\xi), 0 \leq \xi \leq 1$$

(10)

A fração volumétrica α_m e a fração mássica de vapor são relacionadas através da seguinte equação:

$$\alpha_v = f(\alpha_m) = \frac{\rho_w \alpha_m}{\rho_s + (\rho_w - \rho_s) \alpha_m} \quad (11)$$

Já a fração média volumétrica que representa a quantidade de vapor nos tubos de subida, e é de grande importância no modelamento do nível do balão da caldeira, pode ser descrita como:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_v &= \int_0^1 \alpha_v(\xi) d\xi = \frac{1}{\alpha_r} \int_0^{\alpha_r} f(\xi) d\xi \\ \bar{\alpha}_v &= \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_s} \left(1 - \frac{\rho_s}{(\rho_w - \rho_s) \alpha_r} \ln \left(1 + \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s} \alpha_r \right) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

A partir de $\bar{\alpha}_v$ (12), podemos definir o balanço de massa e energia para os tubos de subida como:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\rho_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r) &= q_{dc} - q_r \\ \frac{d}{dt} (\rho_s h_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w h_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r - p V_r + m_r C_p t_s) &= Q + q_{dc} h_w - (\alpha_r h_c + h_w) q_r \end{aligned} \quad (13)$$

sendo q_{dc} a vazão nos *dowmcomers*, q_r a vazão nos *risers* e t_s a temperatura de vapor que é considerada igual à temperatura do metal t_m e

$$q_{dc} = \sqrt{\frac{2 \rho_w A_{dc} (\rho_w - \rho_s) g \bar{\alpha}_v V_r}{k}} \quad (14)$$

$$q_r = q_{dc} - V_r \left(\bar{\alpha}_v \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + (1 - \bar{\alpha}_v) \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + (\rho_w - \rho_s) \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} \right) \frac{dp}{dt} + (\rho_w - \rho_s) V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r} \frac{d\alpha_r}{dt} \quad (15)$$

É possível ainda, relacionar o calor de alimentação do sistema com a vazão nos *dowmcomers*, assim:

$$Q = \alpha_r h_c q_{dc} \quad (16)$$

Sejam as seguintes equações responsáveis por representar o balanço de massa do tubulão (ÅSTRÖM & BELL, 2000):

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}(\rho_s V_{sd}) &= \alpha_r q_r - q_{sd} - q_{cd} \\ q_{cd} &= \frac{h_w - h_s}{h_c} q_f + \frac{1}{h_c} \left(\rho_s V_{sd} \frac{dh_s}{dt} + \rho_w V_{wd} \frac{dh_w}{dt} - (V_{sd} + V_{wd}) \frac{dp}{dt} + m_d C_p \frac{dT_s}{dt} \right) \\ q_{sd} &= \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd} - V_{sd}^0) + \alpha_r q_{dc} + \alpha_r \beta (q_{dc} - q_r)\end{aligned}\quad (17)$$

No tubulão de vapor acontecem fenômenos físicos complexos que influem direta ou indiretamente no nível. O volume de água neste é dado por:

$$V_{wd} = V_{wt} - V_{dc} - (1 - \bar{\alpha}_v) V_r \quad (18)$$

enquanto que a variação de nível l , que é constituído de uma mistura de água e vapor, pode ser representado por:

$$l = \frac{V_{wd} + V_{sd}}{A_d} = l_w + l_s. \quad (19)$$

3.3. Modelo não linear

O modelo não linear proposto por Åström e Bell (2000), possui o volume de água total V_{wt} , a pressão p , a qualidade do vapor α_r e o volume de vapor sob o nível d'água no tubulão superior V_{sd} como variáveis de estado, e a vazão de água de entrada q_f , a vazão de vapor de saída q_s e o calor de alimentação Q como entradas do sistema, mesmo que em muitos sistemas não seja possível controlar a demanda de vapor. Desta forma, seja

$$\begin{aligned}e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} &= q_f - q_s \\ e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} &= Q + q_f h_f - q_s h_s \\ e_{32} \frac{dp}{dt} + e_{33} \frac{d\alpha_r}{dt} &= Q - \alpha_r h_c q_{dc}\end{aligned}$$

$$e_{42} \frac{dp}{dt} + e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44} \frac{dV_{sd}}{dt} = \frac{\partial \rho_s}{T_d} (V_{sd}^0 - V_{sd}) + \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f \quad (20)$$

onde e_{ij} são os coeficientes da matriz $E(x)$, dados a seguir:

$$e_{11} = \rho_w - \rho_s$$

$$e_{12} = V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p}$$

$$e_{21} = \rho_w h_w + \rho_s h_s$$

$$e_{22} = V_{wt} \left(h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) + V_{st} \left(h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}$$

$$e_{32} = \left(\rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} - \alpha_r h_c \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \right) (1 - \bar{\alpha}_v) V_r + \left((1 - \alpha_r) h_c \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) \bar{\alpha}_v V_r \\ + (\rho_s + (\rho_w - \rho_s) \alpha_r) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} - V_r + m_r C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}$$

$$e_{33} = ((1 - \bar{\alpha}_v) \rho_s + \alpha_r \rho_w) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}$$

$$e_{42} = V_{sd} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \frac{1}{h_c} \left(\rho_s V_{sd} \frac{\partial h_s}{\partial p} + \rho_w V_{wd} \frac{\partial h_w}{\partial p} - V_{sd} - V_{wd} + m_d C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \right) \\ + \alpha_r (1 + \beta) V_r$$

$$e_{43} = \alpha_r (1 + \beta) (\rho_s - \rho_w) V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}$$

$$e_{44} = \rho_s \quad (21)$$

Seja x o vetor das variáveis de estado e u o vetor de entrada. O sistema será dado por:

$$E(x(t)) \dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$$

$$y(x(t)) = l(x(t)) \quad (22)$$

sendo

$$x(t) = [V_{wt} \ p \ \alpha_r \ V_{sd}]^T$$

$$u(t) = [q_f \ q_s \ Q]^T$$

Finalmente, o modelo não linear pode ser representado pela Equação (23):

$$E(x(t))\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) = \begin{bmatrix} q_f - q_s \\ Q - q_f h_f - q_s h_s \\ Q - \alpha_r h_c q_{dc} \\ \rho_s \frac{V_{sd0} - V_{sd}}{T_d} + \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f \end{bmatrix} \quad (23)$$

Observa-se que, neste modelo, há quatro estados e três entradas. A matriz $E(x(t))$ é invertível, portanto o modelamento no espaço de estados é possível. Caso contrário, um sistema singular de mesma ordem seria obtido.

3.4. Linearização

A linearização aproxima o comportamento do sistema para pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio, visando possibilitar o emprego de técnicas de projeto baseadas em modelos lineares, que são vastamente utilizadas e estudadas atualmente.

Para realizar a linearização, considera-se a função f de classe C^1 , ou seja, diferenciável uma vez. Dado um sistema autônomo:

$$\dot{x} = f(x)$$

é possível reescrevê-lo na forma

$$\dot{x} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_e=0} x + f_{OS}(x)$$

onde $\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_e=0}$ representa o primeiro termo de desenvolvimento de $f(x)$ em série de Taylor e $f_{OS}(x)$ representa os termos de ordem superior. Uma vez que o desenvolvimento em série é feito em torno do ponto de equilíbrio $x_e = 0$, a expressão não possui termo constante. Dessa forma, desprezando os termos de ordem superior, chega-se ao modelo linearizado:

$$\dot{x} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_e=0} x = Ax$$

onde $\frac{\partial f}{\partial x}$ é a matriz jacobiana da função, denominada de A .

Aplicando-se a linearização ao sistema

$$\dot{\tilde{x}} = E_0^{-1} J_1 \tilde{x} + E_0^{-1} J_2 u$$

$$y = J_3 \tilde{x}$$

(24)

onde

$$J_1 = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0, u=u_0}$$

$$J_2 = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x=x_0, u=u_0}$$

$$J_3 = \left. \frac{\partial l}{\partial x} \right|_{x=x_0}$$

logo, as matrizes jacobianas J_1, J_2 serão dadas por:

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial V_{wt}} & \frac{\partial f_1}{\partial p} & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_r} & \frac{\partial f_1}{\partial V_{sd}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial V_{wt}} & \frac{\partial f_2}{\partial p} & \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_r} & \frac{\partial f_2}{\partial V_{sd}} \\ \frac{\partial f_3}{\partial V_{wt}} & \frac{\partial f_3}{\partial p} & \frac{\partial f_3}{\partial \alpha_r} & \frac{\partial f_3}{\partial V_{sd}} \\ \frac{\partial f_4}{\partial V_{wt}} & \frac{\partial f_4}{\partial p} & \frac{\partial f_4}{\partial \alpha_r} & \frac{\partial f_4}{\partial V_{sd}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_r h_c \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} & -h_c q_{dc} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \frac{(V_{sd0} - V_{sd})}{T_d} & 0 & -\frac{\rho_s}{T_d} \end{bmatrix}$$

(25)

$$J_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_f} & \frac{\partial f_1}{\partial q_s} & \frac{\partial f_1}{\partial Q} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_f} & \frac{\partial f_2}{\partial q_s} & \frac{\partial f_2}{\partial Q} \\ \frac{\partial f_3}{\partial q_f} & \frac{\partial f_3}{\partial q_s} & \frac{\partial f_3}{\partial Q} \\ \frac{\partial f_4}{\partial q_f} & \frac{\partial f_4}{\partial q_s} & \frac{\partial f_4}{\partial Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ h_f & -h_s & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{h_f - h_w}{h_c} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(26)

Substituindo as equações (12) e (18) em (19), temos que

$$l = \frac{V_{wt} - V_{dc} - \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_s} \left(1 - \frac{\rho_s}{(\rho_w - \rho_s)\alpha_r} \ln \left(1 + \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s} \alpha_r \right) \right) \right) V_r + V_{sd}}{A_d} \quad (27)$$

Então a matriz jacobiana J_3 será dada por

$$J_3 = \left[\frac{\partial l}{\partial V_{wt}} \quad \frac{\partial l}{\partial p} \quad \frac{\partial l}{\partial \alpha_r} \quad \frac{\partial l}{\partial V_{sd}} \right]^T = \left[\frac{1}{A_d} \quad \frac{V_r}{A_d} \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} \quad \frac{\partial l}{\partial \alpha_r} \quad \frac{1}{A_d} \right]^T \quad (28)$$

onde

$$N = \alpha_r * \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s};$$

$$\frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} = \frac{1}{(\rho_w - \rho_s)^2} \left(\rho_w \frac{\partial \rho_s}{\partial p} - \rho_s \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \right) * \left(1 + \frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{1}{1+N} - \frac{\rho_s + \rho_w}{N\rho_s} \ln(1+N) \right) \quad (29)$$

$$\frac{\partial l}{\partial \alpha_r} = \frac{\frac{\rho_w \rho_s}{(\rho_w - \rho_s)^2 \alpha_r^2} \ln \left(1 + \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s} \alpha_r \right) V_r - \frac{\rho_w \rho_s}{(\rho_w - \rho_s)^2 \alpha_r} \frac{1}{\left(1 + \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s} \alpha_r \right)} V_r}{A_d} \quad (30)$$

Para realizar as simulações da caldeira, utiliza-se as equações apresentadas nesse capítulo adequando-as aos parâmetros descritos no tópico seguinte.

3.5. Parâmetros

Para a realização da modelagem da caldeira, serão necessários alguns parâmetros físicos e de construção da mesma, retirados a partir de dados fornecidos pelo fabricante:

Tabela 01 – Parâmetros físicos e de construção da caldeira

Parâmetro	Valor
V_t	$61,49m^3$
V_d	$21,75m^3$
V_r	$18,59m^3$
V_{dc}	$9,00m^3$
A_d	$14,08m^2$
A_{dc}	$0,234m^2$
C_p	$550J/(Kg\ ^\circ C)$
g	$9,81m/s^2$
m_d	$29100kg$
m_r	$61000kg$
m_t	$147100kg$
k	25
β	0,3

onde V_{dc} e A_{dc} é o volume e a área dos *downcomer*, C_p é o calor específico do metal, A_d é a área da superfície do líquido no balão, T_d é o tempo de residência do vapor dentro do tubulão e k é o coeficiente de fricção do *loop downcomer-riser*.

Alguns dados são de origem operacional ou foram estipulados levando em conta as características do processo:

Tabela 02 – Dados estipulados ou de origem operacional

Parâmetro	Valor
q_s	$27,78Kg/s$
V_{sd}^0	$10,88m^3$
h_f	$450700J/Kg$

A TAB. 03 foi preenchida com base na tabela de propriedades da água e vapor saturados para as pressões em torno do ponto de operação, onde a pressão p equivale a 4,74MPa.

Tabela 03 – Propriedades da água e do vapor saturado

$p(Pa)$	$t(^{\circ}C)$	$h_w(KJ/Kg)$	$h_s(KJ/Kg)$	$\rho_w(Kg/m^3)$	$\rho_s(Kg/m^3)$
4000000	250,392	1.087,26	2800,65	798,491	20,092
4100000	251,860	1.094,40	2800,12	796,299	20,610
4200000	253,302	1.101,44	2799,56	794,131	21,130
4300000	254,717	1.108,36	2798,95	791,985	21,651
4400000	256,107	1.115,19	2798,31	789,861	22,175
4500000	257,474	1.121,92	2797,64	787,757	22,700
4600000	258,817	1.128,55	2796,93	785,674	23,227
4700000	260,138	1.135,10	2796,19	783,608	23,756
4800000	261,438	1.141,56	2795,41	781,561	24,287
4900000	262,718	1.147,94	2794,61	779,532	24,820
5000000	263,977	1.154,23	2793,77	777,519	25,355
5100000	265,218	1.160,45	2792,91	775,521	25,892
5200000	266,440	1.166,60	2792,02	773,540	26,432
5300000	267,644	1.172,67	2791,10	771,572	26,973
5400000	268,831	1.178,67	2790,15	769,619	27,516
5500000	270,001	1.184,61	2789,18	767,680	28,062

Logo, a partir dos dados da TAB. 01, foram aproximadas as seguintes variáveis em função da pressão:

$$t(p) = 61.604 * \ln(p) - 686.22$$

$$\rho_w(p) = -96.8 * \ln(p) + 2270.5$$

$$\rho_s(p) = 25.035 * \ln(p) - 360.72$$

$$h_w(p) = 305,84 * 10^3 * \ln(p) - 3563,10 * 10^3$$

$$h_s(p) = -2 * 10^{-9}p^2 + 7 * 10^{-3}p + 2796.6 * 10^3 \quad (31)$$

A seguir são representadas as derivadas de cada uma das aproximações acima, que também serão necessárias para o cálculo do modelo:

$$\begin{aligned}\frac{dt(p)}{dt} &= \frac{61.604}{p} \\ \frac{d\rho_w(p)}{dt} &= -\frac{96.8}{p} \\ \frac{d\rho_s(p)}{dt} &= \frac{25.035}{p} \\ \frac{dh_w(p)}{dt} &= \frac{305.84 * 10^3}{p} \\ \frac{dh_s(p)}{dt} &= -4 * 10^{-9}p + 7 * 10^{-3}\end{aligned}\tag{32}$$

Para a simulação do sistema, será considerado que a caldeira esteja em funcionamento a uma pressão $p = 4,74MPa$, e então deverão ser determinadas as variáveis no ponto de operação e as condições iniciais serão obtidas anulando-se as derivadas das equações de estado (23).

$$\begin{aligned}q_f &= q_s \\ Q &= q_s h_s - q_f h_f \\ Q &= q_{dc} \alpha_r h_c \\ V_{sd} &= V_{sd}^0 - \frac{T_d(h_w - h_f)}{p_s h_c} q_f\end{aligned}\tag{33}$$

A vazão de entrada de água q_f foi considerada como 27,78Kg/s (aproximadamente 100ton/h). Em seguida este valor é aplicado na segunda equação de (33) para encontrar o calor de entrada Q . Resolvendo o sistema de equações não lineares formado por (12), (14) e (16), encontra-se a qualidade do vapor α_r , então será possível calcular q_{dc} , e a partir da quarta equação de (33) com o valor estipulado de V_{sd}^0 encontra-se o volume de vapor no balão V_{sd} .

Tabela 04 – Valores para as condições iniciais

Parâmetro	Valor
$t(p)$	260,68°C
$\rho_w(p)$	983,06Kg/m ³
$\rho_s(p)$	23,98Kg/m ³
$h_w(p)$	1138,13KJ/Kg
$h_s(p)$	2795,89KJ/Kg
q_f	27,78Kg/s
q_s	27,78Kg/s
Q	65,150MW
p	4,74MPa
V_{wt}	31,21m ³
α_r	0,044
V_{sd}	6,105m ³

4. TEORIA DE CONTROLE MODERNO

O controle automático tem desempenhado um papel fundamental no avanço da engenharia e da ciência em geral. Além da extrema importância em sistemas de veículos espaciais, de direcionamento de mísseis, robóticos e similares, o controle automático é de suma importância e parte integrante dos modernos processos industriais e de produção.

Tais avanços no controle automático, na teoria e na prática, vêm produzindo meios para otimizar o desempenho dos sistemas dinâmicos, melhorando a produtividade, diminuindo o trabalho árduo de várias rotinas e operações manuais repetitivas.

O modelo matemático de um sistema dinâmico é definido como um conjunto de equações que representa com precisão ou, pelo menos, razoavelmente bem a dinâmica do sistema. Um sistema é representado de muitas maneiras diferentes e, portanto, pode ter vários modelos matemáticos, dependendo da perspectiva considerada.

De forma que a dinâmica de muitos sistemas mecânicos, elétricos, térmicos, econômicos, biológicos, dentre outros, é descrita em termos de equações diferenciais, obtidas pelas leis físicas que regem determinado sistema, por exemplo, as leis de Newton para sistemas mecânicos e as leis de Kirchhoff para sistemas elétricos.

Os modelos matemáticos podem assumir diferentes formas e dependendo do sistema considerado e das circunstâncias particulares, um modelo matemático pode ser mais adequado que outro. Por exemplo, nos sistemas de controle ótimo, é vantajoso utilizar representações do modelo no espaço de estados. Enquanto que, para a análise da resposta transitória ou da resposta em frequência de um sistema linear, invariante no tempo, de entrada e saída únicas, a representação pela função de transferência pode ser mais conveniente. Uma vez obtido o modelo matemático de um sistema, podem ser utilizadas várias ferramentas analíticas e de computação para efeito de análise e síntese.

Nesse sentido, a tendência moderna dos sistemas de engenharia é aumentar sua complexidade em virtude principalmente da necessidade de realizar tarefas

complexas e de alta precisão. A teoria de controle moderno é aplicada a sistemas de entradas e saídas múltiplas (do inglês MIMO – *multiple input – multiple output*), que podem ser lineares ou não lineares, variantes ou não no tempo.

4.1. Espaço de estados

Como definido por Ogata (2003), o estado de um sistema dinâmico é o menor conjunto de variáveis (chamadas de variáveis de estado), tais que o conhecimento dessas variáveis em $t = t_0$, juntamente com o conhecimento da entrada para $t \geq t_0$, determina completamente o comportamento do sistema para qualquer instante $t \geq t_0$.

A análise no espaço de estados envolve três tipos de variáveis que estão presentes na modelagem de sistemas dinâmicos: variáveis de entrada representadas por $u(t)$, variáveis de saída representadas por $y(t)$ e variáveis de estado representadas por $x(t)$.

O equacionamento de um sistema em espaço de estados, contínuo no tempo, é definido por:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \end{cases}$$

sendo a primeira equação definida como equação de estados do sistema e a segunda denominada equação de saída, onde $A(t)$ é chamada de matriz de estado, $B(t)$, matriz de entrada, $C(t)$, matriz de saída, e $D(t)$, de matriz de transmissão direta. Todas estas matrizes possuem dimensões apropriadas.

Se as matrizes $A(t), B(t), C(t)$ e $D(t)$ forem constantes, ou seja, não dependentes do tempo, o sistema é dito invariante no tempo. Se o sistema é multivariável as dimensões dos componentes do modelo são: $x(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times n_u}$, $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u \times 1}$, $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y \times 1}$, $C \in \mathbb{R}^{n_y \times n}$ e $D \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$, onde n_u é o número de entradas e n_y o número de saídas do sistema.

Seja o seguinte sistema de ordem n representado por uma equação diferencial ordinária:

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = u \quad (34)$$

Observando-se que o conhecimento de $y(0), \dot{y}(0), \dots, y^{(n-1)}(0)$, junto com a entrada $u(t)$ para $t \geq 0$, determina completamente o comportamento futuro do sistema, é possível considerar $y(t), \dot{y}(t), \dots, y^{(n-1)}(t)$ como um conjunto de n variáveis de estado.

Definindo

$$\begin{aligned} x_1 &= y \\ x_2 &= \dot{y} \\ &\vdots \\ x_n &= y^{(n-1)} \end{aligned}$$

a Equação (34) pode ser escrita do seguinte modo:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n \\ \dot{x}_n &= a_n x_1 - \dots - a_1 x_n + u \end{aligned}$$

com

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

onde

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

e a saída pode ser dada por:

$$y = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (36)$$

com

$$y = Cx$$

sendo

$$C = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0].$$

Dessa maneira, um sistema em espaço de estados poderá ser rescrito pelas equações (35) e (36). Além da simples forma de representação que o espaço de estados proporciona para um sistema, atualmente conta-se com diversas técnicas de controle desenvolvidas para trabalhar especialmente neste modelo.

4.2. Sistemas de controle

Podemos definir basicamente dois tipos de sistemas: de malha fechada e de malha aberta. Os sistemas de controle de malha fechada, também conhecidos como sistema de controle com realimentação, estabelecem uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando a diferença como meio de controle. Nestes sistemas, o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação, realimenta o controlador, de modo que minimize o erro e acerte a saída do sistema ao valor desejado.

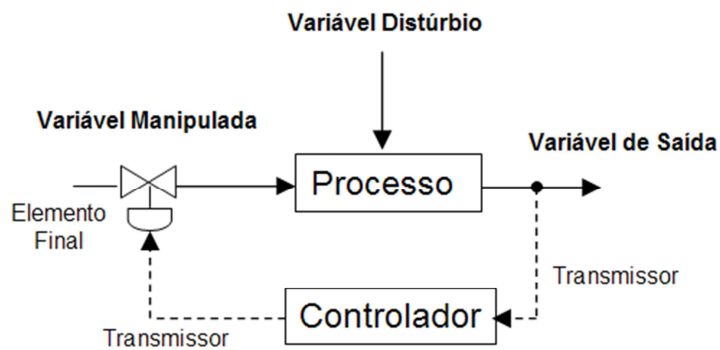


Figura 04 – Sistema de controle em malha fechada

Já os sistemas de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema, ou seja, o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada, de forma que a ação é implementada a partir de situações predefinidas.

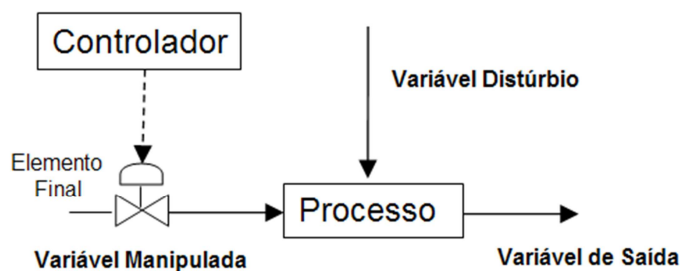


Figura 05 – Sistema de controle em malha aberta

Entre os controladores em malha aberta é possível destacar uma forma de controle por antecipação, também conhecida por *feedforward*, que leva em consideração a variável de distúrbio ao invés da variável de saída. Conforme mostrado na FIG. 06, o controlador toma conhecimento da variável de distúrbio e pode tomar alguma decisão antes mesmo de essa interferir no processo. Apesar das vantagens desse controlador em relação à ação antecipatória, um inconveniente nesta configuração é o fato de que o controlador não tem informação sobre as condições de saída do processo e, portanto, não é hábil para determinar a precisão da compensação

dos distúrbios pelo processo. Dessa forma, essa estratégia de controle é muito utilizada em sistemas mais complexos, atuando juntamente com um controle em malha fechada.

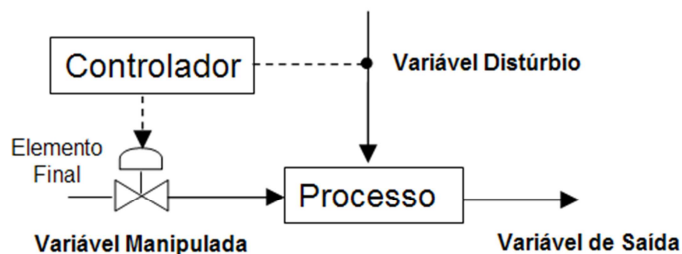


Figura 06 – Sistema de controle por antecipação – *feedforward*

4.3. Propriedades do sistema

Os conceitos de controlabilidade e observabilidade foram introduzidos por Kalman no desenvolvimento da Teoria de Controle Moderno. Eles têm um papel importante no projeto no modelo em espaço de estados. De fato, as condições de controlabilidade e observabilidade podem ditar a existência de uma solução completa para o problema de projeto do sistema de controle. A solução desse problema pode não existir, se o sistema considerado é não controlável. (OGATA, 2003, p. 638).

Embora a maioria dos sistemas físicos seja controlável ou observável, os correspondentes modelos matemáticos podem não exibir a propriedade de controlabilidade e observabilidade. Então, é necessário conhecer as condições nas quais um sistema é controlável e/ou observável.

4.3.1. Controlabilidade

Considerando-se o sistema no modelo espaço de estados:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

(37)

O sistema descrito acima será controlável em $t = t_0$ se for possível construir um sinal de controle não limitado que transfira o sistema de um estado inicial para qualquer estado final, em um intervalo de tempo finito.

O critério para analisar se um sistema é controlável ou não é feito através da análise de posto da matriz de controlabilidade \mathcal{C} .

$$\mathcal{C} = [B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B]$$

sendo $\mathcal{C} \in \mathbb{R}^{n \times n n_u}$

De forma que o sistema será controlável caso o posto da matriz de controlabilidade \mathcal{C} seja n , ou esta contenha n vetores-colunas linearmente independentes. Caso contrário o sistema será dito não controlável, sendo possível afirmar que o mesmo possui um subsistema fisicamente desconectado da entrada.

4.3.2. Observabilidade

Considerando ainda o sistema descrito em (37).

Tal sistema será observável se existe um instante $t_1 > 0$ tal que, para qualquer condição inicial x_0 em $t = 0$, o conhecimento da entrada $u[0, t_1]$ e da saída $y[0, t]$ é suficiente para determinar x . Se o estado inicial pode ser determinado com o conhecimento da entrada, podemos reconstruir toda a trajetória $x(t)$ do sistema.

O conceito de observabilidade é útil na solução de problemas de reconstrução de variáveis de estado não mensuráveis a partir de valores mensuráveis, no menor intervalo de tempo possível. Além de ser muito importante porque, na prática, a dificuldade encontrada com o controle por realimentação de estado é que algumas variáveis de estado não são acessíveis por medição direta, sendo necessário estimar a variável não mensurável para construir o sinal de controle (OGATA, 2003).

O critério para analisar se um sistema é observável ou não é feito através da análise da matriz de observabilidade \mathcal{O} .

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

sendo $\mathcal{O} \in \mathbb{R}^{n \times n}$

de forma que o sistema será observável caso o posto da matriz de observabilidade \mathcal{O} seja n ou possuir n vetores-colunas linearmente independentes.

4.3.3. Estabilidade

A estabilidade de um sistema pode ser definida de diversas maneiras e segundo vários pontos de vista. Uma das definições mais utilizadas é o conceito BIBO de estabilidade (*bounded input-bounded output*). Segundo esse conceito, um sistema é considerado estável se para todo sinal de amplitude limitada aplicado em sua entrada, o sinal de saída é também limitado. Por outro lado, se o sistema é instável, ao aplicarmos um sinal de amplitude limitada em sua entrada, sua saída divergirá com o passar do tempo, ou seja, a amplitude do sinal de saída tenderá a crescer indefinidamente.

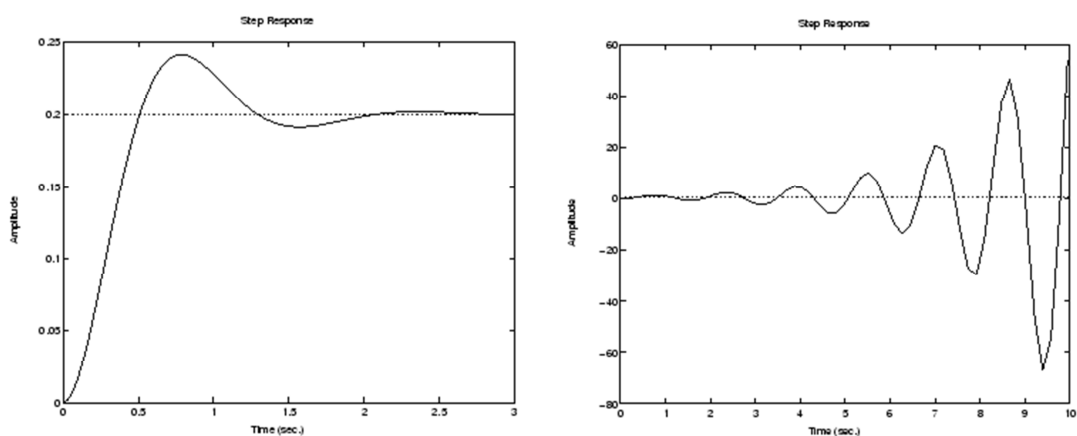


Figura 07 – Sistema estável / sistema instável

A FIG. 07 mostra a resposta de dois sistemas a uma entrada do tipo degrau unitário que se constitui de um sinal de amplitude limitada. Note que a resposta do sistema à esquerda é limitada em amplitude e, portanto, esse sistema é estável. Já o segundo apresenta uma resposta com comportamento divergente sendo, portanto, instável.

De acordo com o posicionamento dos polos no plano complexo, é possível atribuir as seguintes características ao sistema:

- Estabilidade: se todos os pólos estiverem no semi-plano esquerdo;
- Caso crítico: se o sistema possui ao menos 1 par de polos complexos conjugados sobre o eixo imaginário. Neste caso a resposta em regime permanente do sistema a uma entrada de amplitude limitada será uma senóide.
- Instabilidade: se o sistema possuir ao menos 1 polo no semi-plano direito.

4.3.4. Estabilizabilidade

Para sistemas parcialmente controláveis, se os modos não controláveis forem estáveis e os modos instáveis forem controláveis, o sistema será considerado estabilizável. Por exemplo, considere o sistema (DORF, 2001):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

cuja matriz de controlabilidade é dada por:

$$C = [B \ AB] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Através da análise de posto de C se verifica que o sistema não é controlável. Além disso, o modo estável que corresponde ao autovalor -1 não é controlável. Já o modo instável que corresponde ao autovalor 1 é controlável. Este sistema pode se

tornar estável pelo uso de uma realimentação apropriada. Desta forma, o sistema é estabilizável.

4.3.5. Detectabilidade

De forma dual à análise anterior, tem-se que para sistemas parcialmente observáveis, se os modos não observáveis forem estáveis e os modos instáveis forem observáveis, o sistema será considerado detectável (DORF, 2001). Considerando-se o mesmo sistema da subseção anterior:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$
$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

cuja matriz de controlabilidade é dada por:

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Através da análise de posto de \mathcal{C} verifica-se que o sistema não é observável. Além disso, o modo estável que corresponde ao autovalor -1 não é observável. Já o modo instável que corresponde ao autovalor 1 é observável. Este sistema pode se tornar estável pelo uso de uma realimentação apropriada. Desta forma, o sistema é detectável.

5. ANÁLISE E SIMULAÇÕES DO MODELO

Neste capítulo serão realizadas algumas simulações para os modelos linear e não linear, a fim de verificar a eficácia da linearização. Também será realizada uma análise das características do modelo obtido com o intuito de observar suas propriedades, como controlabilidade e observabilidade.

5.1. Simulações

As simulações a seguir foram realizadas através do software *MATLAB*[®]. Para o sistema não linear foi utilizado a função *ode45*, uma das diversas ferramentas para resolver problemas de valor inicial para equações ordinárias.

Como a simulação baseia-se na resolução de um sistema de equações diferenciais, é necessário reescrever as equações de (20) em função das variáveis de estado, isolando os termos de suas derivadas:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= -\frac{e_{12}(Q - h_s q_s + h_f q_f) + e_{22}(q_s - q_f)}{e_{11}e_{22} - e_{12}e_{21}} \\
 \dot{x}_2 &= \frac{1}{e_{22}} \left(Q - h_s q_s + h_f q_f + \frac{e_{21}e_{12}(Q - h_s q_s + h_f q_f) + e_{21}e_{22}(q_s - q_f)}{e_{11}e_{22} - e_{12}e_{21}} \right) \\
 \dot{x}_3 &= -\frac{1}{e_{33}} \left(\frac{e_{32}}{e_{22}} \left(Q - h_s q_s + h_f q_f + \frac{e_{21}e_{12}(Q - h_s q_s + h_f q_f) + e_{21}e_{22}(q_s - q_f)}{e_{11}e_{22} - e_{12}e_{21}} \right) - Q \right. \\
 &\quad \left. + h_c q_{dc} x_3 \right) \\
 \dot{x}_4 &= \frac{1}{e_{44}} \left(\frac{q_f(h_f - h_w)}{h_c} - \frac{e_{42}}{e_{22}} \left(Q - h_s q_s + h_f q_f + \frac{e_{21}e_{12}(Q - h_s q_s + h_f q_f) + e_{21}e_{22}(q_s - q_f)}{e_{11}e_{22} - e_{12}e_{21}} \right) + \right. \\
 &\quad \left. \frac{P_s(V_{sdo} - x_4)}{T_d} + \left(\frac{e_{43}}{e_{33}} \left(\frac{e_{32}}{e_{22}} \left(Q - h_s q_s + h_f q_f + \frac{e_{21}e_{12}(Q - h_s q_s + h_f q_f) + e_{21}e_{22}(q_s - q_f)}{e_{11}e_{22} - e_{12}e_{21}} \right) - Q + \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. h_c q_{dc} x_3 \right) \right) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{38}$$

Já no caso do modelo linear, as simulações foram realizadas utilizando a função *lsim*, que simula a resposta no tempo de sistemas lineares contínuos ou discretos para entradas arbitrárias, para tal é necessário montar o sistema (24) conforme as matrizes calculadas (25), (26) e (28) e os parâmetros da TAB. 01:

$$E_0^{-1} = \begin{bmatrix} 7,637 * 10^{-4} & 5,112 * 10^{-10} & 0 & 0 \\ -881,366 & 8,120 * 10^{-4} & 0 & 0 \\ 4,122 * 10^{-5} & -3,797 * 10^{-11} & 1,159 * 10^{-10} & 0 \\ 1,327 * 10^{-4} & -1,223 * 10^{-8} & 1,896 * 10^{-8} & 4,148 * 10^{-2} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Assim, as matrizes A , B e C são:

$$A = E_0^{-1}J_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4,388 * 10^{-13} & -0,170 & 0 \\ 0 & 5,155 * 10^{-7} & -27,802 & -0,323 \end{bmatrix}$$

$$B = E_0^{-1}J_2 = \begin{bmatrix} 9,940 * 10^{-4} & -2,193 * 10^{-3} & 5,112 * 10^{-10} \\ -515,401 & -1,389 * 10^3 & 8,120 * 10^{-4} \\ 2,410 * 10^{-5} & 6,495 * 10^{-5} & 7,789 * 10^{-11} \\ -9,442 * 10^{-3} & 2,091 * 10^{-2} & 6,735 * 10^{-9} \end{bmatrix}$$

$$C = J_3^T = [7,102 * 10^{-2} \quad -6,792 * 10^{-8} \quad 6,399 \quad 7,102 * 10^{-2}] \quad (40)$$

desta forma, o sistema linearizado equivale a:

$$\dot{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4,388 * 10^{-13} & -0,170 & 0 \\ 0 & 5,155 * 10^{-7} & -27,802 & -0,323 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 9,940 * 10^{-4} & -2,193 * 10^{-3} & 5,112 * 10^{-10} \\ -515,401 & -1,389 * 10^3 & 8,120 * 10^{-4} \\ 2,410 * 10^{-5} & 6,495 * 10^{-5} & 7,789 * 10^{-11} \\ -9,442 * 10^{-3} & 2,091 * 10^{-2} & 6,735 * 10^{-9} \end{bmatrix} u$$

$$y = [7,102 * 10^{-2} \quad -6,792 * 10^{-8} \quad 6,399 \quad 7,102 * 10^{-2}] \tilde{x} \quad (41)$$

Observe que a dimensão da matriz B mostra quantas entradas têm o sistema e a dimensão de A , a ordem do mesmo.

Todas as simulações que seguem foram realizadas em torno do ponto de equilíbrio e funcionamento, com as entradas: vazão de alimentação $q_f = 27,78 \text{ kg/s}$,

vazão de vapor $q_s = 27,78\text{kg/s}$ e fornecimento de calor de alimentação $Q = 65,150\text{MW}$; e condições iniciais das variáveis de estado: volume de água total $V_{wt} = 31,21\text{m}^3$, pressão $p = 4,74\text{MPa}$, qualidade do vapor $\alpha_r = 0,044$ e volume de vapor abaixo do nível de água $V_{sd} = 6,105\text{m}^3$.

5.1.1. Distúrbio no fornecimento de água

Na simulação a seguir foi aplicado um degrau de 5kg/s na vazão de água de alimentação q_f em um instante de tempo $T = 50\text{s}$.

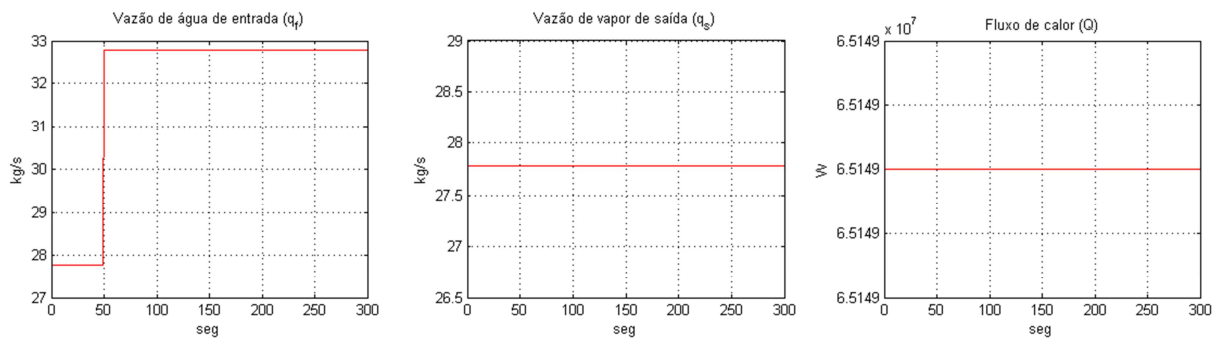


Figura 08 – Entradas com degrau no fornecimento de água

Como se pode notar na FIG. 09, o distúrbio no fornecimento de água mostrado na FIG. 08 acarreta no aumento no volume total de água do tubo V_{wt} , na queda na pressão do tubo p e na redução do volume de vapor no tubo V_{sd} , devido à queda da pressão;

É possível notar ainda que a qualidade do vapor α_r eleva-se em um primeiro momento, devido à queda da pressão, entretanto logo em seguida com o aumento da circulação de água no sistema a qualidade do vapor decai constantemente.

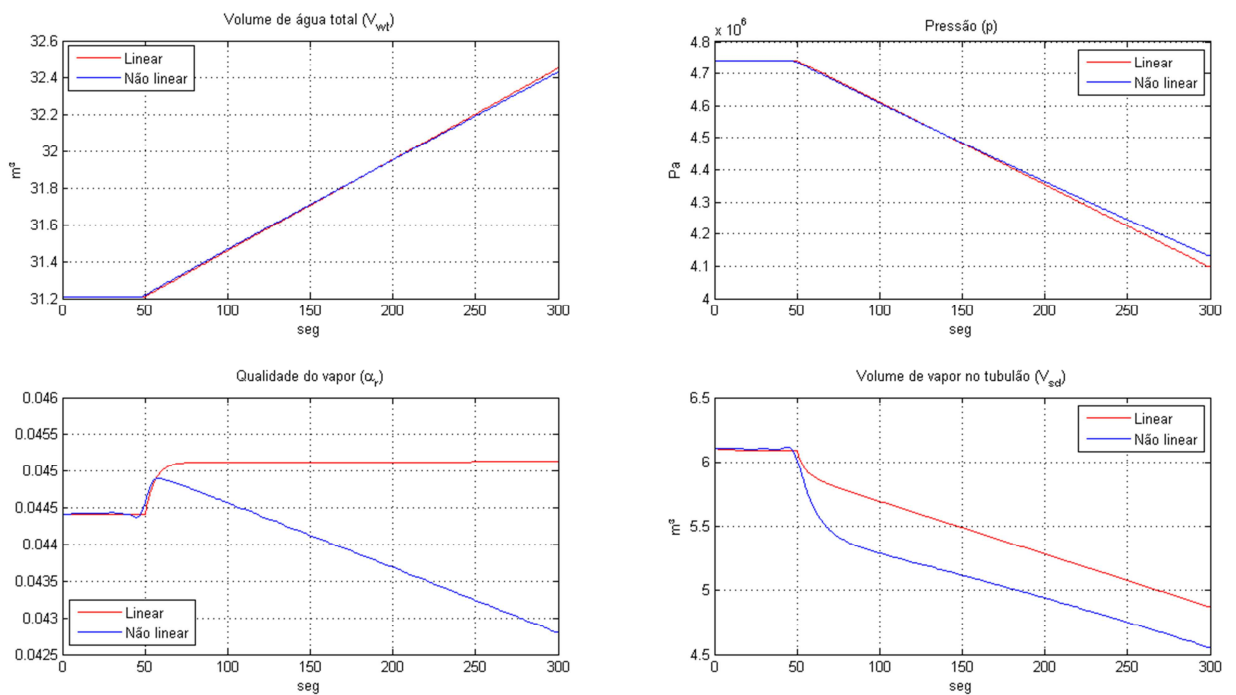


Figura 09 – Comportamento das variáveis de estado para distúrbio no fornecimento de água

Já a FIG. 10 mostra que o nível aumenta devido ao aumento da vazão de água de entrada.

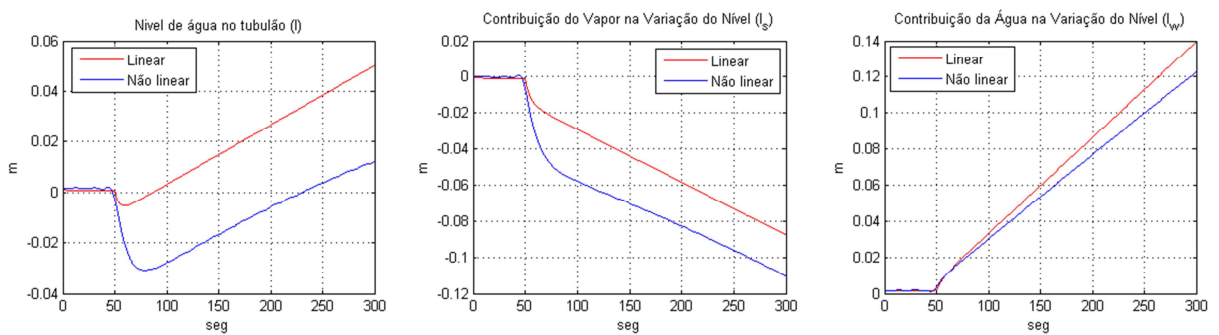


Figura 10 – Comportamento do nível de água para distúrbio em q_f

5.1.2. Distúrbio na vazão de vapor

A simulação de distúrbios na vazão de vapor de saída é uma das mais importantes para uma adequada análise do modelo, pois é o evento que ocorre com maior frequência na geração de energia, devido às variações do consumo de energia/vapor. A seguir será apresentada a resposta do sistema a um degrau de 5kg/s aplicado na vazão de vapor de saída q_s em um instante de tempo $T = 50\text{s}$.

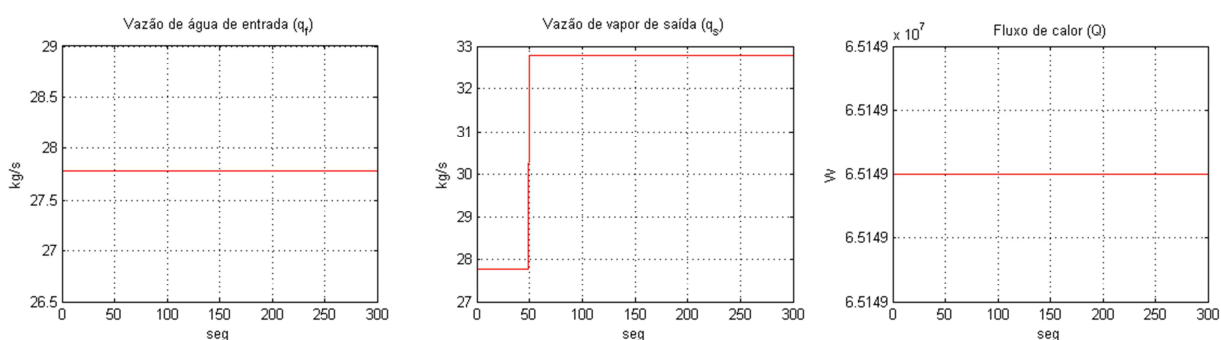


Figura 11 – Entradas com degrau na vazão de vapor

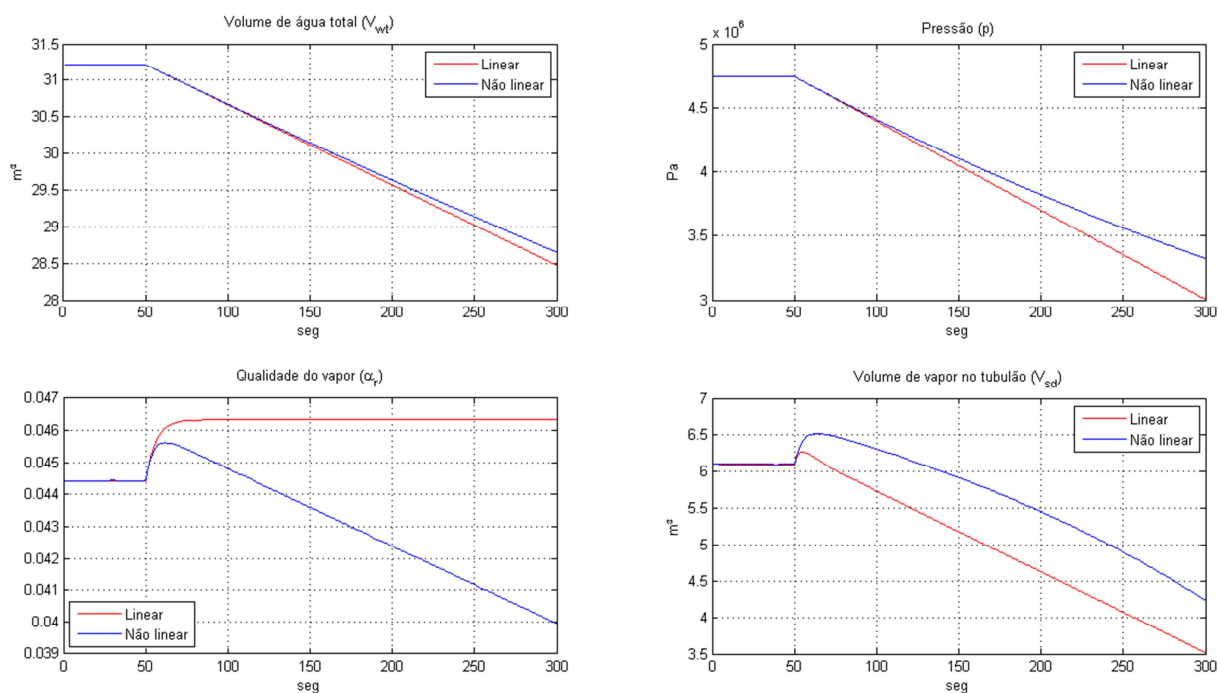


Figura 12 – Comportamento das variáveis de estado para distúrbio no demanda de vapor

Com o degrau na vazão de vapor mostrado na FIG. 11, há uma queda na pressão p do balão superior. Essa queda de pressão acarreta no aumento da evaporação de água, o que implica na diminuição do volume total de água V_{wt} , bem como no rápido aumento do volume de vapor V_{sd} , que logo em seguida decai graças à maior circulação de água no sistema. Dessa mesma forma, pode se definir o comportamento da qualidade de vapor α_r .

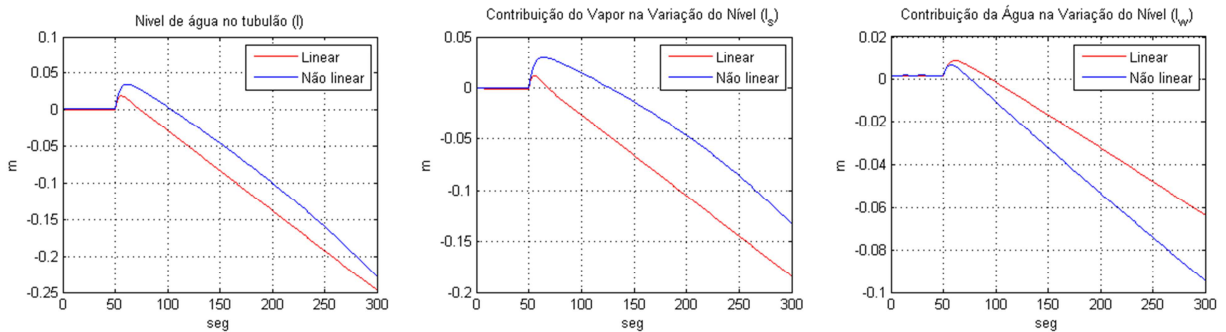


Figura 13 – Comportamento do nível de água para distúrbio em q_s

Na FIG. 13 é possível observar a influência do volume de vapor V_{sd} para o nível l_s e da água para o nível l_w , onde ambas contribuem para o decaimento do nível l do tubo.

5.1.3. Distúrbio no fornecimento de calor

Conforme mostra a FIG. 14, na simulação apresentada nas figuras 15 e 16, foi aplicado um degrau de $10MW$ no fornecimento de calor Q em um instante de tempo $T = 50s$.

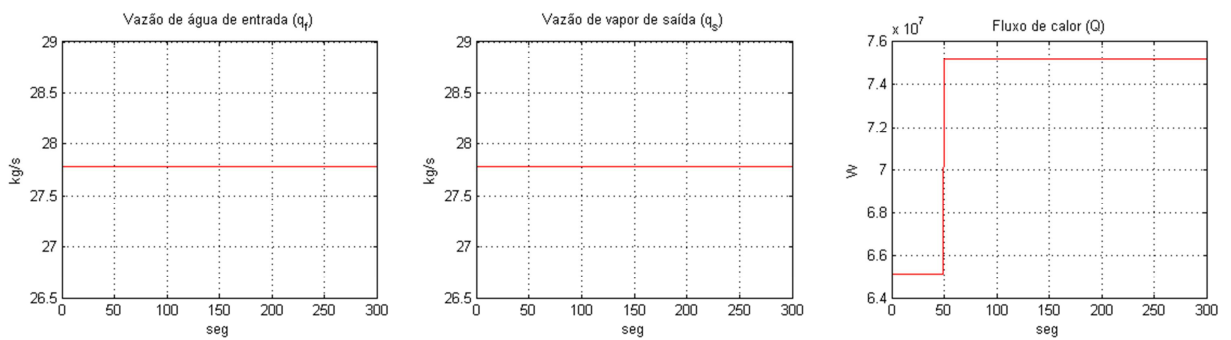


Figura 14 – Entradas com degrau no fornecimento de calor

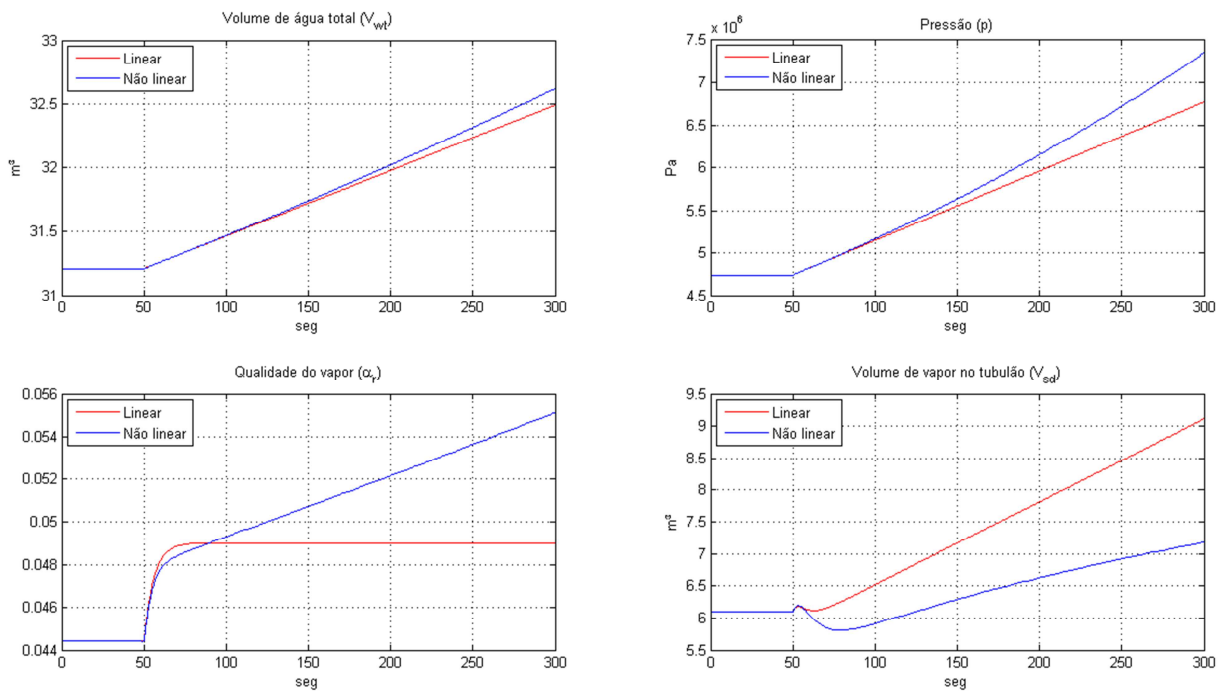


Figura 15 – Comportamento das variáveis de estado para distúrbio no fornecimento de calor

Devido ao aumento no fornecimento de calor Q , ocorre um aumento da pressão p , que ocasiona o aumento do volume total de água do sistema V_{wt} , devido à condensação, que também provoca a diminuição do volume de vapor no tubulão V_{sd} .

O aumento de Q também favorece a troca térmica dos tubos, que acarreta no aumento da qualidade do vapor α_r .

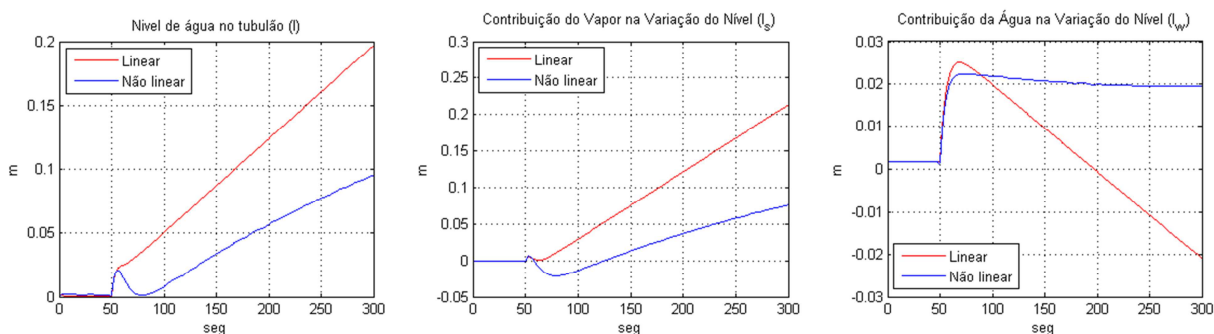


Figura 16 – Comportamento do nível de água para distúrbio em Q

Realizando uma análise mais criteriosa das simulações a cerca do funcionamento do sistema, é possível observar que o modelo linear apresenta comportamento bem próximo do modelo não linear, possibilitando realizar o controle através daquele.

Outro ponto importante a ser levantado se relaciona ao fato dos modelos em malha aberta serem instáveis, levando as variáveis a valores não limitados.

5.2. Análise do sistema

As propriedades de controlabilidade e observabilidade podem ditar a existência de uma solução completa para o problema de projeto do sistema de controle.

Se a matriz de controlabilidade \mathcal{C} tem posto linha pleno (completo), o sistema é controlável. Para se determinar o posto pleno de uma matriz basta verificar o número de linhas não nulas quando a mesma está escrita na forma escalonada reduzida por linhas.

Seja \mathcal{C} a matriz de controlabilidade do sistema definida por:

$$\mathcal{C} = [B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B]$$

então

$$C = \begin{bmatrix} 9,940 * 10^{-4} & -2,193 * 10^{-3} & 5,112 * 10^{-10} & 0 \\ -515,401 & -1,389 * 10^{+3} & 8,120 * 10^{-4} & 0 \\ 2,410 * 10^{-5} & 6,495 * 10^{-5} & 7,789 * 10^{-11} & -4,097 * 10^{-6} \dots \\ -9,442 * 10^{-3} & 2,091 * 10^{-2} & 6,735 * 10^{-9} & 2,203 * 10^{-4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots -1,104 * 10^{-5} & -1,324 * 10^{-11} & 696,4516 * 10^{-6} & 1,877 * 10^{-6} \dots \\ -4,042 * 10^{-3} & -2,754 * 10^{-9} & 9,187 * 10^{-5} & 7,111 * 10^{-5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots 2,251 * 10^{-12} & -1,184 * 10^{-7} & -3,191 * 10^{-7} & -3,826 * 10^{-13} \\ 6,436 * 10^{-11} & -2,855 * 10^{-5} & -1,233 * 10^{-4} & -1,269 * 10^{-10} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Assim, calculando o posto da matriz (42), verifica-se que essa possui posto linha igual a quatro, concluindo-se que o sistema é controlável. Portanto, é possível aplicar estratégias de controle a fim da estabilização do sistema em malha fechada.

Da mesma forma, caso a matriz de observabilidade O tenha posto coluna pleno, o sistema é considerado observável. Então, seja a matriz de observabilidade definida por:

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

logo

$$O = \begin{bmatrix} 7,102 * 10^{-2} & -6,792 * 10^{-8} & 6,399 & 7,102 * 10^{-2} \\ 0 & 7,419 * 10^{-9} & -3,062 & -7,102 * 10^{-3} \\ 0 & -7,408 * 10^{-10} & 0,718 & 7,102 * 10^{-4} \\ 0 & 7,390 * 10^{-11} & -0,142 & -7,102 * 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Verifica-se que a matriz (43) possui posto coluna igual a três, logo o sistema não é observável, portanto para realimentação de estados tratada nos capítulos seguintes, será considerado que todas as variáveis de estado são acessadas diretamente, ou seja, são mensuráveis.

6. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE E SIMULAÇÕES

Durante o funcionamento de uma caldeira, a função das malhas de controle de nível é manter o nível do balão superior dentro dos limites desejados, variando a vazão de água de alimentação adicionada ao tubulão, atuando na válvula de controle de nível.

Estas malhas devem procurar eliminar a interação existente entre o sistema de controle de nível e o de combustão. Esta interação é evidenciada pela vazão irregular da água de alimentação que pode causar perturbações na pressão de vapor, ocasionando variações na taxa de aquecimento, sem que tenha ocorrido variações na demanda de vapor. Tais variações na taxa de aquecimento provocam expansão ou contração (*shrink and swell*), que por sua vez, acentuam e dão continuidade ao problema.

O controle de nível do tubulão superior se faz necessário tendo em conta os seguintes fatores:

- a elevação do nível acima do limite máximo específico provoca arraste excessivo de gotículas de água ao superaquecedor ou turbinas, danificando os equipamentos, afetando a disponibilidade operacional e gerando onerosos custos;
- a queda do nível abaixo do limite mínimo pode provocar perda de circulação em alguns tubos, causando seu superaquecimento, gerando riscos de ruptura e explosões;
- durante um aumento brusco na demanda de vapor de uma caldeira, ocorre a chamada expansão que é a súbita elevação do nível do tubulão causado pela intensa formação de vapor devido a queda instantânea de pressão no sistema;
- durante uma queda brusca na demanda de vapor, ocorre justamente o oposto do descrito no item anterior: a contração, devido ao aumento instantâneo de pressão no tubulão;

Os fenômenos conhecidos como *shrink and swell* (contração e expansão), ocorrem principalmente com a mudança repentina da pressão, entretanto, devido à

dinâmica do processo, com pressão constante também ocorrem tais fenômenos, porém com menor intensidade.

Quanto maior a capacidade da caldeira, mais estreitos serão os limites de variação do nível e conseqüentemente, mais complexa deverá ser a malha de controle utilizada.

6.1. Controle PID cascata com *feedforward*

Há diversas estratégias de controle aplicadas ao controle de nível de uma caldeira, entretanto a mais utilizada atualmente é baseada em três elementos e foi desenvolvida visando eliminar os problemas causados pelas variações na pressão de água de alimentação.

Este tipo de estratégia leva em consideração o nível da caldeira, a vazão de água de entrada e a vazão de vapor de saída, atuando diretamente na válvula de controle de água de alimentação.

Neste tipo de malha, normalmente se coloca o transmissor de vazão de água após a válvula. A vantagem desta posição é a de evitar-se que as oscilações de pressão que venham ocorrer na água de alimentação influenciem no controle, uma vez que, neste ponto, a pressão é constante e igual à pressão do tubulão, que é mantida pelo controlador de pressão de vapor.

Esta malha utiliza controle antecipatório com realimentação, combinado ao controle cascata. Neste caso, a correção antecipada do nível será feita pela vazão de vapor e a realimentação será feita pelo transmissor e controlador de nível, enquanto a vazão de água será mantida pela malha escrava de controle de água, em função do ponto de ajuste recebido do somador.

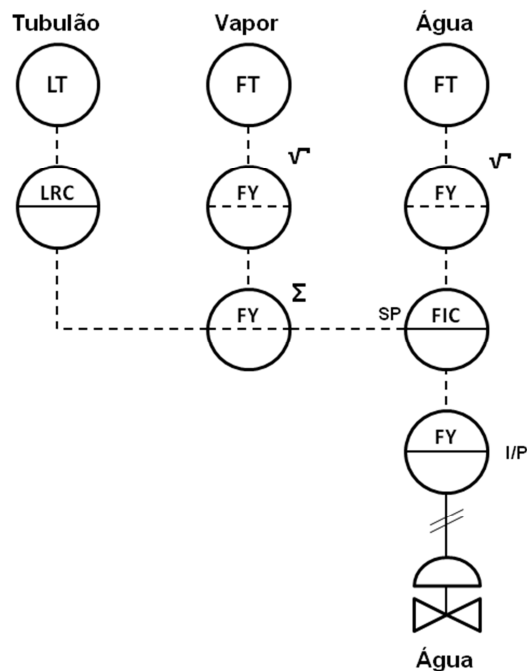


Figura 17 – Estratégia de controle de nível a três elementos

Conforme pode ser visto na FIG. 17, a saída do somador será função do sinal recebido do transmissor de vazão de vapor enquanto o nível estiver no ponto de ajuste, uma vez que nestas condições a saída do transmissor de nível (LRC) permanecerá estável. Caso o nível saia do ponto de ajuste, a saída do LRC variará e, conseqüentemente, a saída do somador passará a ser função dos sinais recebidos do FT e do LRC; isto irá ocorrer até que o sistema volte às condições de equilíbrio, ou seja, até que o nível volte ao ponto de ajuste. O controlador da malha escrava de vazão de água de alimentação atuará na válvula de controle de forma a manter a vazão de água de alimentação adicionada à caldeira, de acordo com o ponto de ajuste recebido do somador.

O controlador responsável por essa estratégia de controle, que também é utilizado atualmente no controle de nível da caldeira é apresentado na FIG. 18, como pode ser visto abaixo:

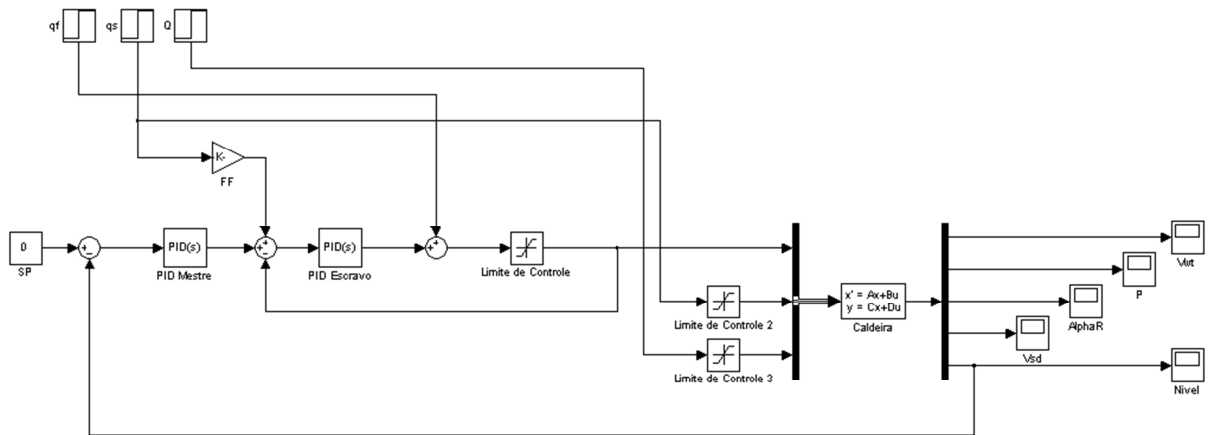


Figura 18 – Diagrama de blocos – controlador PID cascata com *feedforward*

Não serão detalhados os cálculos e técnicas utilizadas para sintonia do controlador acima, uma vez que a finalidade deste é apenas para comparação de desempenho com o controlador apresentado no tópico seguinte. Os ganhos foram retirados do sistema em funcionamento e adaptados às grandezas do modelo.

Na FIG. 18, nota-se as entradas do sistema: vazão mássica de água de alimentação q_f , vazão mássica de vapor de saída q_s e calor de alimentação Q , as duas malhas de PID formando o controle em cascata, onde PID mestre realiza o controle do nível e o PID escravo é responsável pelo controle da vazão q_f , utilizando uma compensação antecipatória da vazão de vapor q_s com ganho *feedforward* K . Também foi colocado na entrada do sistema, limitadores das variáveis de entrada com a finalidade de estabelecer os limites físicos do mesmo.

O sistema utilizado para simulação foi o sistema linearizado em espaço de estados apresentado em (41) com a matriz C modificada a fim de apresentar o valor dos estados como saída, conforme abaixo:

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{x}} = & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4,388 * 10^{-13} & -0,170 & 0 \\ 0 & 5,155 * 10^{-7} & -27,802 & -0,323 \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} 9,940654 * 10^{-4} & -2,193 * 10^{-3} & 5,112 * 10^{-10} \\ -515,401 & -1,389 * 10^3 & 8,120 * 10^{-4} \\ 2,410 * 10^{-5} & 6,495 * 10^{-5} & 7,789 * 10^{-11} \\ -9,442 * 10^{-3} & 2,091 * 10^{-2} & 6,735 * 10^{-9} \end{bmatrix} u \\
y = & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 7,102 * 10^{-2} & -6,792 * 10^{-8} & 6,399 & 7,102 * 10^{-2} \end{bmatrix} \tilde{x}
\end{aligned} \tag{44}$$

Os ganhos e parâmetros utilizados nas simulações seguem na tabela abaixo:

Tabela 05 – Parâmetros do controlador PID cascata com *feedforward*

Parâmetro	Valor
Ganho FF	10^{-1}
PID Mestre – P	$2 * 10^2$
PID Mestre – I	$2 * 10^{-3}$
PID Mestre – D	3
PID Escravo – P	$9 * 10^{-3}$
PID Escravo – I	$1,4 * 10^{-2}$
PID Escravo – D	3
Limite q_f	0 – 150
Limite q_s	0 – 150
Limite Q	0 – 10^9

6.2. Regulador linear quadrático

O Regulador Linear Quadrático, do inglês *Linear Quadratic Regulator* (LQR) é uma técnica no domínio do tempo que tem margem de estabilidade garantida: margem de fase de 60 graus e margem de ganho infinita (MACIEJOWSKI, 1989). Portanto, possui a qualidade de estabilidade robusta. Neste tópico será introduzido o controle LQR conforme definição de Ogata (2003).

Seja considerado o problema do regulador quadrático ótimo que, dada a equação do sistema

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (45)$$

permite determinar a matriz K do vetor de controle ótimo

$$u(t) = -Kx(t) \quad (46)$$

para minimizar o índice de desempenho

$$J = \int_0^{\infty} (x^* Qx + u^* Ru) dt \quad (47)$$

onde Q e R são matrizes hermitianas definidas positivas ou matrizes reais simétricas, sendo responsáveis por determinar a importância relativa do erro e o consumo de energia dos sinais de controle.

A lei de controle linear dada pela equação (46) é a lei de controle ótimo, portanto, se os elementos não conhecidos da matriz K forem determinados para minimizar o índice de desempenho, então $u(t) = -Kx(t)$ será ótimo para qualquer estado inicial $x(0)$. A FIG. 19 mostra o diagrama de blocos para a configuração ótima.

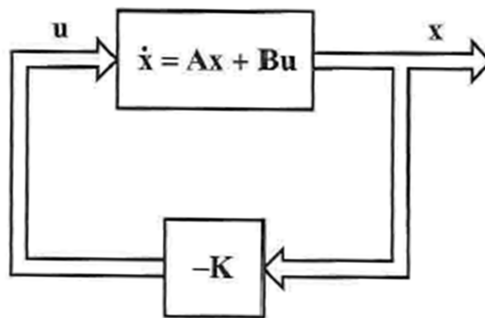


Figura 19 – Sistema regulador ótimo – Fonte: OGATA (2003)

Substituindo as equações (45) e (46) em (47), o funcional de custo poderá ser reescrito por:

$$J = \int_0^{\infty} x^T (Q + K^T R K) x dt \quad (48)$$

Fazendo

$$x^T (Q + K^T R K) x = -\frac{d}{dt} (x^T P x) \quad (49)$$

onde P também é uma matriz hermitiana definida positiva ou simétrica real, é possível obter:

$$x^T (Q + K^T R K) x = -\dot{x}^T P x - x^T P \dot{x} = [(A - BK)^T P + P(A - BK)]x$$

Comparando ambos os lados da equação acima e sabendo que esta deve ser verdadeira para qualquer que seja x , tem-se necessariamente que

$$(A - BK)^T P + P(A - BK) = -(Q + K^T R K) \quad (50)$$

Sendo $A - BK$ uma matriz estável, existirá uma matriz definida positiva P que satisfaça à Equação (50). É importante ressaltar que se pode encontrar mais de uma matriz P que satisfaça a equação, entretanto apenas uma P definida positiva será útil.

Então, o índice de desempenho J pode ser calculado como:

$$J = \int_0^{\infty} x^T (Q + K^T R K) x dt = -x^T(\infty) P x(\infty) + x^T(0) P x(0) \quad (51)$$

Como $A - BK$ é estável, todos os seus autovalores possuem partes reais negativas, então se tem que $x(\infty) \rightarrow 0$. Desta forma, o índice de desempenho J será dado em função da condição inicial $x(0)$ e P :

$$J = x^T(0) P x(0)$$

Como R também é uma matriz hermitiana definida positiva ou real simétrica, é possível escrevê-la como

$$R = T^T T$$

sendo T uma matriz não singular, então a Equação (45) poderá ser expressa da seguinte forma:

$$A^T P + P A + [TK - (T^T)^{-1} B^T P]^T [TK - (T^T)^{-1} B^T P] - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$$

Assim, para resolver o problema de controle quadrático ótimo, deve-se minimizar J em relação a K , e para isso deve-se minimizar também em relação a K a seguinte equação:

$$x^T [TK - (T^T)^{-1} B^T P]^T [TK - (T^*)^{-1} B^T P] x$$

Como esta última expressão é não negativa, o mínimo ocorre quando ela é zero ou quando

$$TK = (T^T)^{-1} B^T P$$

Portanto,

$$K = T^{-1} (T^T)^{-1} B^T P = R^{-1} B^T P \quad (52)$$

a Equação (52) fornece a matriz ótima K . Assim, quando o índice de desempenho é dado pela Equação (48), a lei de controle ótimo é linear e é dada por:

$$u(t) = -Kx(t) = -R^{-1}B^T Px(t)$$

A matriz P deve satisfazer a Equação (50) ou a equação matricial reduzida de Riccati:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (53)$$

Deve-se ainda ressaltar que o índice de desempenho pode ser dado em termos do vetor de saída em vez do vetor de estados, ficando:

$$J = \int_0^{\infty} (y^T Q y + u^T R u) dt$$

E poderá ser modificada utilizando a equação de saída $y = Cx$, para:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T C^T Q C x + u^T R u) dt \quad (54)$$

6.2.1. LQR com matriz de estados aumentada

Considere que os *setpoints* são dados para as saídas do sistema, ao invés dos estados. Assim, a matriz de ganho K será composta por duas matrizes K_x e K_z e deverão ser contempladas no projeto do Regulador Linear Quadrático com os novos estados incluídos pelo integrador.

Para isso, se define um estado aumentado $x_a = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}$ e $\dot{z} = y$.

Dessa forma, a equação de estado e saída do sistema, dadas por:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

tornam-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ax + Bu \\ Cx + Du \end{bmatrix}$$

que, por sua vez, equivalem a:

$$\begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} u.$$

De forma análoga,

$$\begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} x_a + \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} u.$$

Portanto, a equação de saída, por sua vez, passa a ser:

$$y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + Du$$

que equivale a

$$y = [C \quad 0]x_a + Du.$$

Assim, o modelo do Regulador Linear Quadrático com a matriz de estados aumentada leva em consideração para o cálculo das entradas ótimas, tanto as variáveis de estado, quanto a saída, de forma a permitir a definição de um *setpoint*.

O sistema utilizado nas simulações é o mesmo simulado anteriormente (44), assim como os limites de controle.

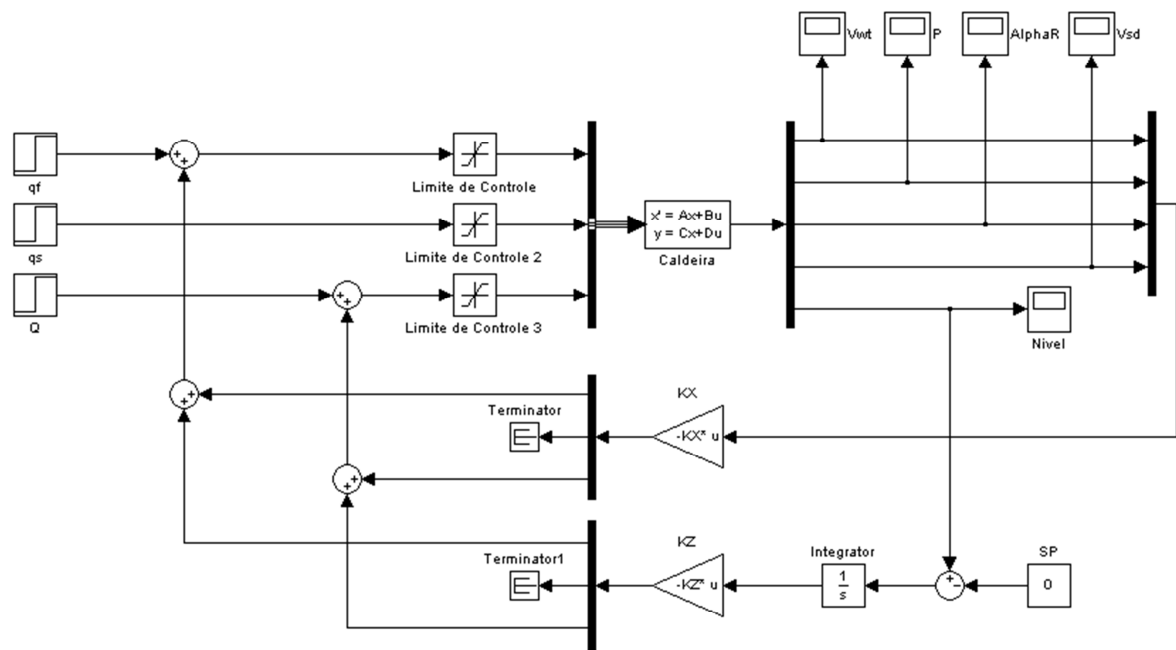


Figura 20 – Diagrama de blocos – controlador LQR

A FIG. 20 representa o modelo de controle pelo LQR, que é composto pela realimentação dos estados com uma matriz de ganho K_x e pela realimentação da saída com um ganho K_z dotado de um integrador.

Como a lei de controle obtida pelo Regulador Linear Quadrático fornece as entradas ótimas para o sistema dadas suas saídas e estados, pode-se utilizá-lo para controlar também a alimentação de combustível/calor de alimentação e a demanda de vapor. Dessa maneira, será feito o uso da entrada de calor de alimentação Q com o intuito de eliminar o controle externo.

6.2.2. Sintonia do LQR

Para sintonizar o regulador LQR, é necessário definir as características desejadas quanto à evolução dos estados da planta, como os valores máximos aceitos pelo sistema, saturação da lei de controle, resposta do sistema em regimes transitório e permanente, etc. Essa sintonia pode ser realizada de diversas maneiras, sendo a

utilização de métodos heurísticos (tentativa e erro) e Algoritmos Genéticos (AG) pertencentes à área da Inteligência Artificial, as mais conhecidas.

Foi utilizado um método empírico, onde inicialmente são definidos valores iniciais para as matrizes de penalização Q e R , levando em consideração que, como cada estado do sistema representa uma grandeza física, a intenção é mantê-los dentro de valores naturais e ao mesmo tempo obter um sistema estabilizado.

A correlação entre as variáveis de estado é desprezada, o que leva Q a ser uma matriz diagonal. Também é importante saber que, definidos os elementos que compõem as matrizes de penalização dos estados, se ambas as matrizes forem multiplicadas pelo mesmo coeficiente positivo, o ganho K gerado pelas equações de Riccati permanece inalterado, ou seja, não é importante a magnitude das matrizes, mas sim as relações existentes entre os elementos que as compõem.

O primeiro passo da sintonia do regulador foi definir uma matriz Q identidade e simulá-la juntamente com uma matriz diagonal R , variando os termos r_i em potências de 10^n , com $-7 \leq n \leq 7$, conforme abaixo.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 \end{bmatrix}$$

O algoritmo calcula então as respostas do nível e seleciona as matrizes R em que a variação do mesmo não ultrapasse $\pm 0.3m$, que corresponde à $\pm 15,0\%$ do diâmetro. Realizando uma análise gráfica, observa-se o melhor resultado para a matriz:

$$R = \begin{bmatrix} 10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{bmatrix}$$

Aplicando o mesmo algoritmo, desta vez, variando os termos da diagonal de Q , obtém-se:

$$Q = \begin{bmatrix} 10^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10^5 \end{bmatrix}$$

Então, é realizado um ajuste fino às matrizes até o ponto em que os requisitos do projeto sejam atendidos, obtendo-se:

$$Q = \begin{bmatrix} 10^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10^5 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{bmatrix}$$

(55)

6.3. SIMULAÇÕES

A matriz de realimentação do Regulador Linear Quadrático é calculada utilizando o comando *lqr* do *MATLAB*[®], que fornece a resolução da equação de Ricatti (53) dada as matrizes Q e R (55), e A_a e B_a de estados aumentados abaixo (56):

$$A_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4,388 * 10^{-13} & -0,170 & 0 & 0 \\ 0 & 5,155 * 10^{-7} & -27,802 & -0,323 & 0 \\ 7,102 * 10^{-2} & -6,792 * 10^{-8} & 6,399 & 7,102 * 10^{-2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_a = \begin{bmatrix} 9,940654 * 10^{-4} & -2,193 * 10^{-3} & 5,112 * 10^{-10} \\ -515,401 & -1,389 * 10^3 & 8,120 * 10^{-4} \\ 2,410 * 10^{-5} & 6,495 * 10^{-5} & 7,789 * 10^{-11} \\ -9,442 * 10^{-3} & 2,091 * 10^{-2} & 6,735 * 10^{-9} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(56)

Então, a matriz de realimentação do LQR é:

$$K = \begin{bmatrix} 39,607 & -4,133 * 10^{-4} & -5,401 & 1,367 & 5,800 \\ -17,013 & -10^3 & 1,322 & -0,669 & -2,722 \\ 2,595 * 10^4 & 0,592 & 6,130 * 10^4 & 3,032 * 10^3 & 1,459 * 10^4 \end{bmatrix} \quad (57)$$

Logo,

$$K_x = \begin{bmatrix} 39,607 & -4,133 * 10^{-4} & -5,401 & 1,367 \\ -17,013 & -10^3 & 1,322 & -0,669 \\ 2,595 * 10^4 & 0,592 & 6,130 * 10^4 & 3,032 * 10^3 \end{bmatrix}$$

$$K_z = \begin{bmatrix} 5,800 \\ -2,722 \\ 1,459 * 10^4 \end{bmatrix} \quad (58)$$

Como visto no tópico 5.2, o sistema não é observável, então, para a realização das simulações foi considerado que todos os estados são acessíveis, ou seja, podem ser medidos diretamente no sistema físico.

6.3.1. Simulação – regime permanente

A simulação a seguir busca representar a partida do sistema até a entrada em regime permanente, sem a aplicação de distúrbios.

Tabela 06 – Condições iniciais – simulação sem distúrbio

Parâmetro	Valor
V_{wt}	$31,21m^3$
p	$4,74MPa$
α_r	$0,044$
V_{sd}	$6,105m^3$

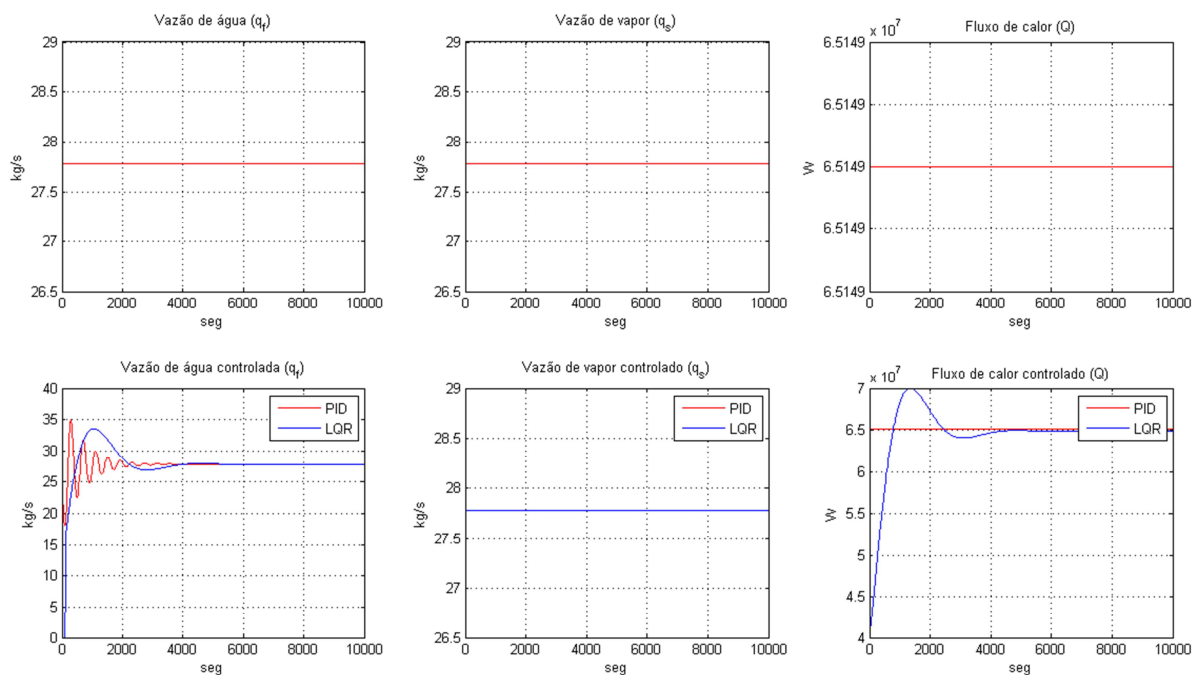


Figura 21 – Entradas – simulação sem distúrbio

Como pode ser visto na FIG. 21, as entradas foram consideradas constantes, e para o controlador PID cascata com *feedforward*, observa-se o controle realizado apenas na vazão de água, enquanto que no caso do Regulador Linear Quadrático há a manipulação também do fluxo de calor.

A FIG. 22 apresenta as variáveis de estados durante o período de estabilização do sistema, nota-se que o fato do LQR atuar também no fluxo de calor influi diretamente na rápida estabilização destas variáveis físicas. Caso não exista este controle de forma automática, o operador deverá sempre ficar atento e monitorando todas as grandezas a fim de intervir manualmente no sistema.

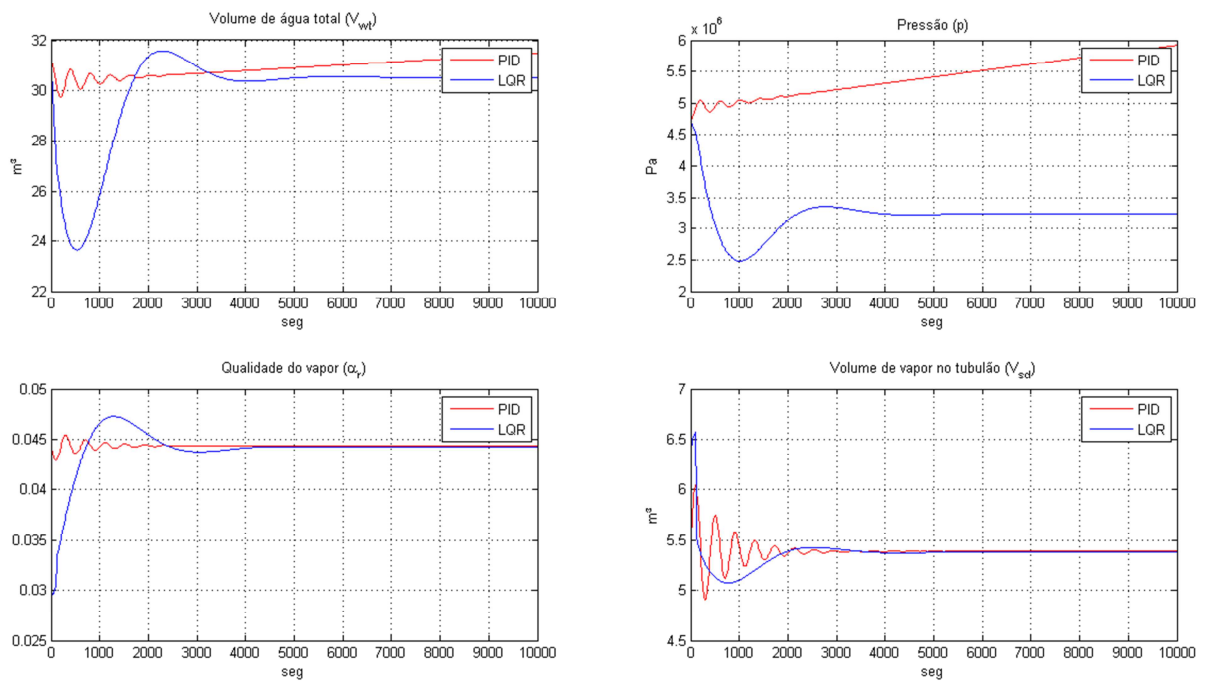


Figura 22 – Variáveis de estados – simulação sem distúrbio

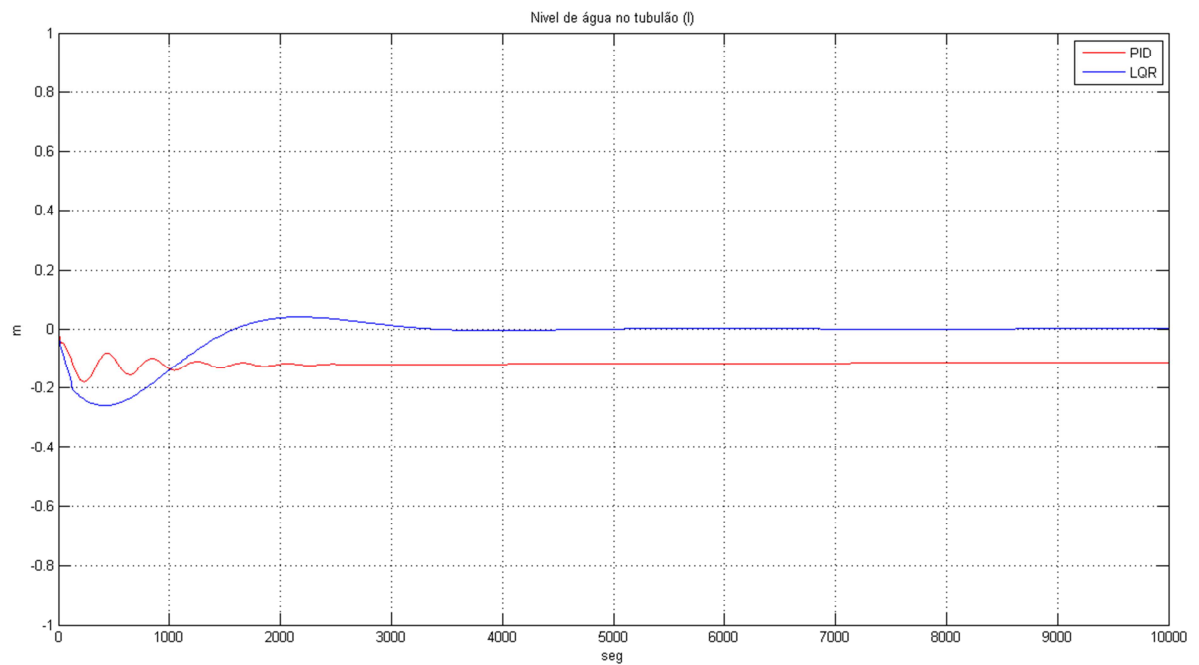


Figura 23 – Variação de nível no tubulão – simulação sem distúrbio

Na FIG. 23, tem-se a variação do nível do tubulão onde ambos os controles oferecem uma estabilização em cerca de 2000 a 3000 seg, entretanto no caso do PID cascata com *feedforward* há um erro em relação ao *setpoint* que é corrigido lentamente devido aos baixos ganhos dos controladores PIDs de ambas as malhas. No controle LQR, o *setpoint* é alcançado de forma muito mais eficiente apresentando uma amplitude de oscilação um pouco maior, porém mais suave.

6.3.2. Simulação – distúrbio na água de alimentação em regime permanente

Estas simulações apontam a reação do sistema à presença de distúrbios em condições de operação de regime permanente. O distúrbio será aplicado na vazão de água de alimentação, a principal entrada de controle, e simula o defeito em alguma bomba ou alguma outra anomalia na alimentação da caldeira.

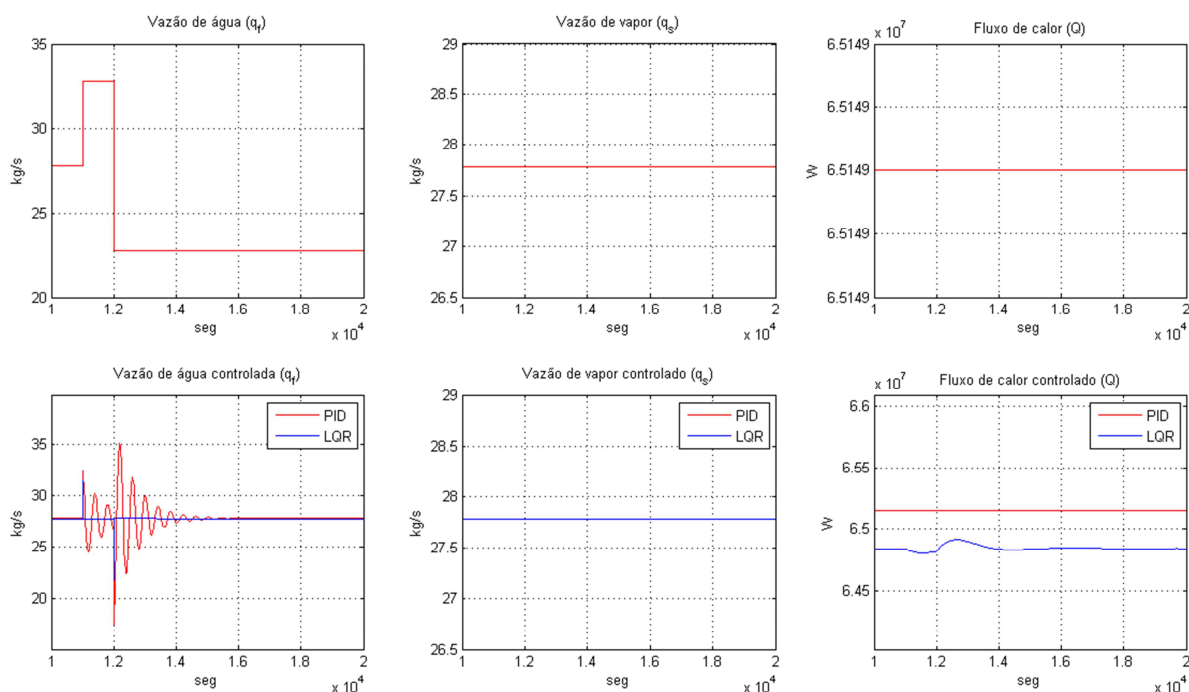


Figura 24 – Entradas – distúrbio na alimentação de água em regime permanente

Os distúrbios aplicados na alimentação de água são mostrados na FIG. 24, bem como o controle aplicado ao sistema para correção da variação.

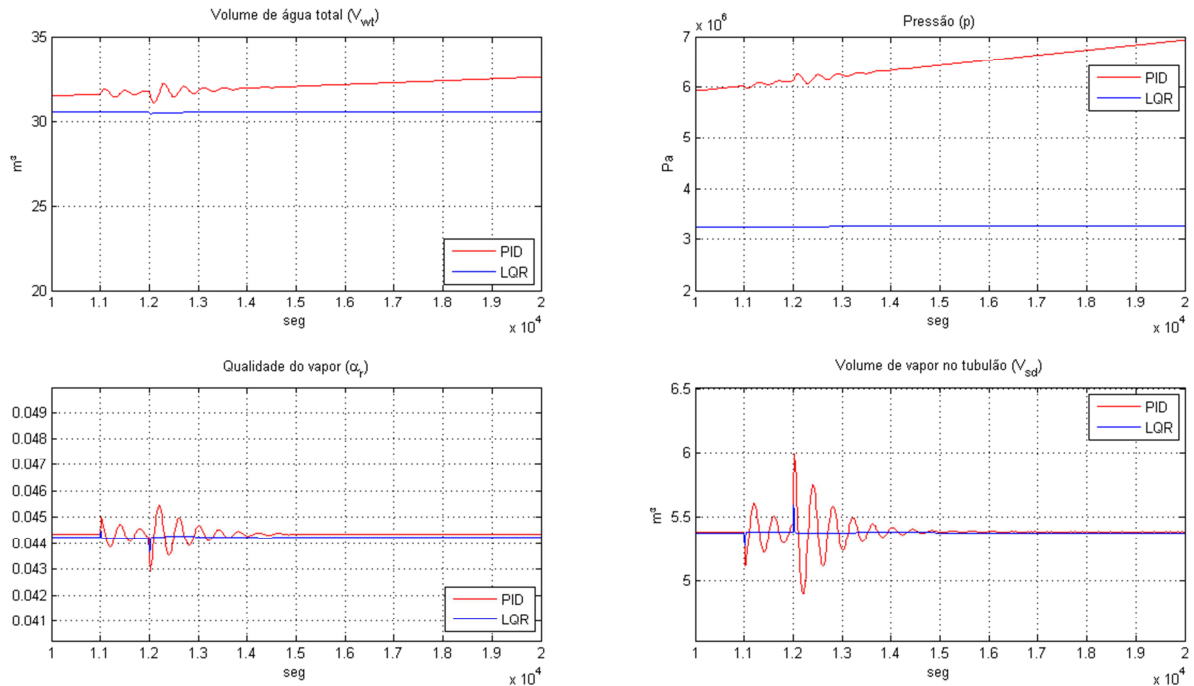


Figura 25 – Variáveis de estados – distúrbio na alimentação de água em regime permanente

As figuras 25 e 26 retratam as variáveis de estado e a variação do nível no tubo, reafirmando o observado nas simulações anteriores: a rápida estabilização destas variáveis no controle pelo Regulador Linear Quadrático e uma oscilação em algumas no controle PID cascata com *feedforward*.

Observa-se ainda no nível de água do tubo de vapor, a pequena influência deste distúrbio para o regulador que corrige praticamente instantaneamente e mantém o nível estável.

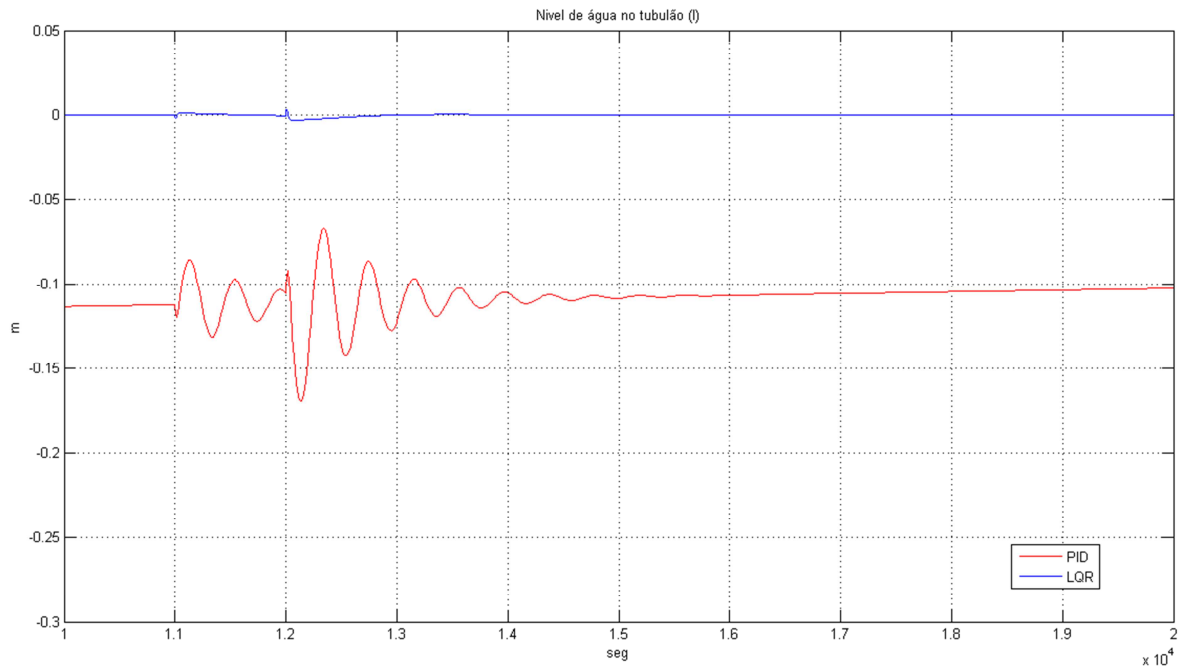


Figura 26 – Variação de nível no tubulão – distúrbio na alimentação de água em regime permanente

6.3.3. Simulação – distúrbio na vazão de vapor em regime permanente

Esta simulação também demonstra a reação do sistema à presença de distúrbios em condições de operação de regime permanente. O distúrbio aplicado na vazão de vapor é a variação mais importante do sistema e, como tratado anteriormente, é responsável pela grande maioria dos desarmes de caldeiras. Este distúrbio visa simular grandes variações na demanda de energia, uma vez que a caldeira em estudo fornece vapor para cogeração de energia.

As entradas do sistema foram dadas conforme abaixo, é muito importante ressaltar que a vazão de vapor controlado apresenta a mesma resposta da vazão de vapor, uma vez que não há controle algum atuando sobre essa entrada.

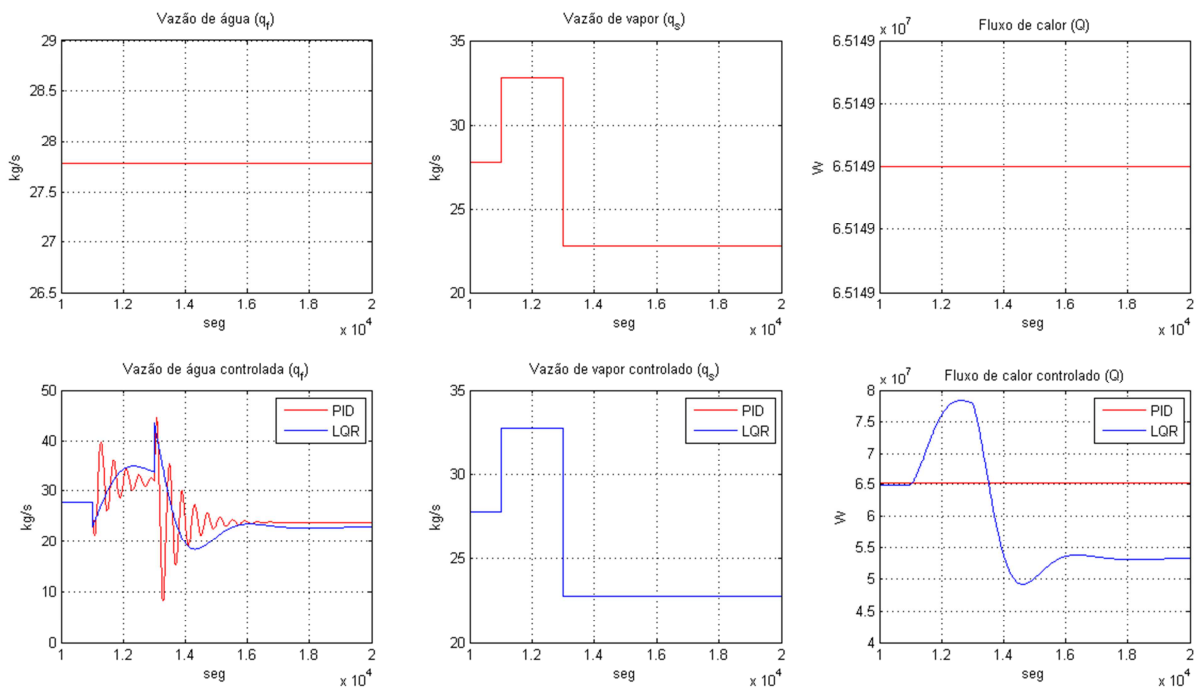


Figura 27 – Entradas – distúrbio na vazão de vapor em regime permanente

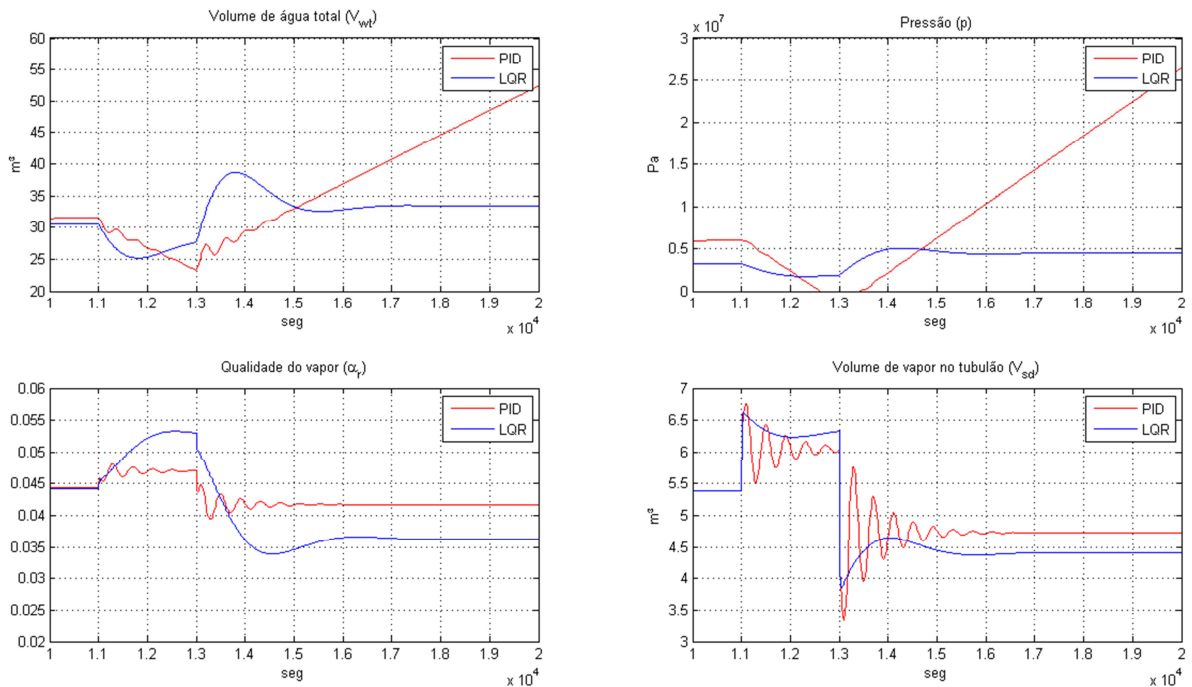


Figura 28 – Variáveis de estados – distúrbio na vazão de vapor em regime permanente

Para tais entradas, obtém-se a resposta do sistema conforme as figuras 28 (variáveis de estado) e 29 (nível no tubulão superior). Mais uma vez, um ponto importante nesta simulação é a estabilização das variáveis de estado para o controle LQR, enquanto que o PID cascata com *feedforward* leva o volume total de água e a pressão do sistema a valores muito altos, por não haver o controle no fornecimento de calor. Também, devem-se ressaltar as oscilações ocorridas, tanto no nível (saída do sistema) quanto em alguns estados, em especial o volume de vapor no tubulão como uma das deficiências do controle cascata.

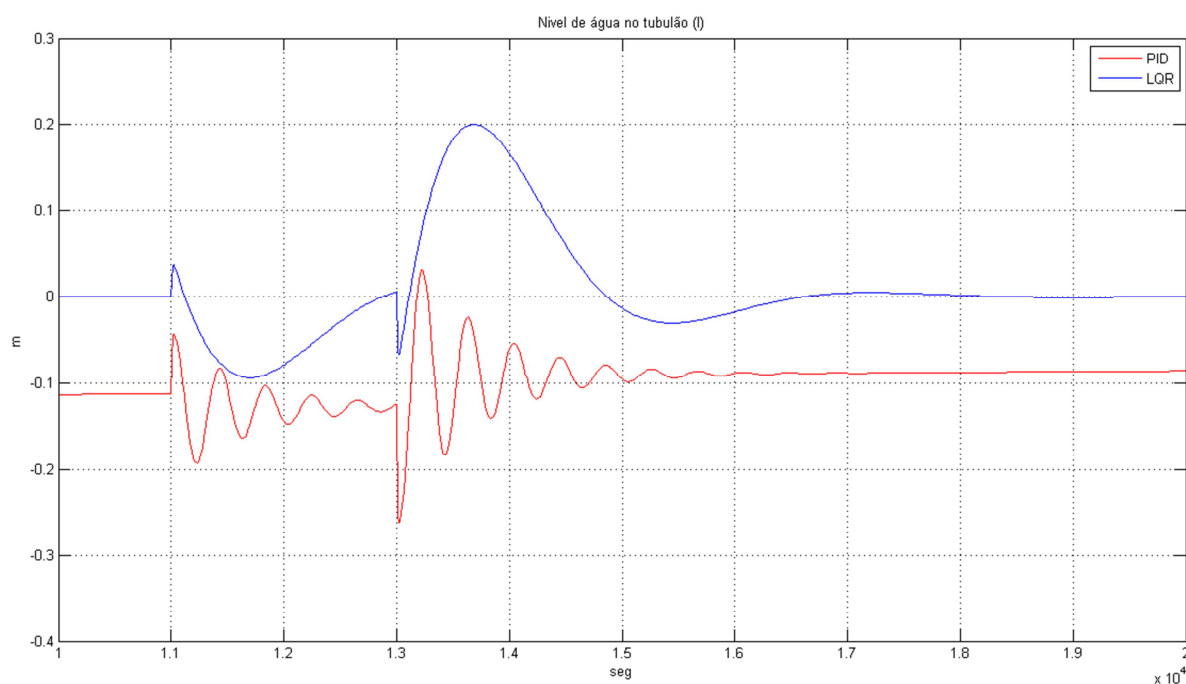


Figura 29 – Variação de nível no tubulão – distúrbio na vazão de vapor em regime permanente

Ainda é possível observar a volta do nível ao estado inicial definido pelo *setpoint*, e que apesar da maior amplitude na oscilação, o controle LQR ainda encontra-se dentro de uma faixa de trabalho aceitável para operação da caldeira.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o funcionamento de uma caldeira aquatubular e métodos de controle de nível para a melhor estabilidade da mesma. Baseando-se em uma caldeira real, o modelamento foi realizado utilizando o modelo proposto em Åström e Bell (2000) e a partir de dados de projeto e características físicas, foram obtidas equações diferenciais formando um sistema não linear. A partir dessas equações foi realizada a linearização do sistema através do cálculo do Jacobiano no ponto de operação, o que possibilitou a passagem do sistema para o modelo em espaço de estados.

Na tentativa de corrigir algumas falhas no controle da caldeira, bem como a falta de estabilidade para variações na vazão de vapor, que ocorrem principalmente na partida do equipamento, foi proposto um novo método de controle com o uso do Regulador Linear Quadrático, que em vários quesitos mostrou-se superior ou similar ao atual controle de nível por PID cascata com *feedforward*. O controle foi aplicado ao modelo linear, o que foi possível graças a similaridade de comportamento entre esse e o modelo não linear original.

A falta de controle do fluxo de calor também mostrou-se um gargalo no controle de nível da caldeira, levando variáveis de estados a valores fora dos nominais. Logo, a utilização do controlador robusto é justificada mais uma vez por permitir em um único controlador, o controle de ambas as entradas, levando em consideração cada variável de importância para o funcionamento do sistema.

Como o intuito deste trabalho não era de sintonia dos controladores e sim a aplicação do Regulador Linear Quadrático no controle de nível da caldeira, fica como sugestão de trabalhos futuros a utilização de algoritmos genéticos (AG) para a sintonia do regulador a fim de tentar otimizar seu ganho, melhorando ainda mais o funcionamento da caldeira. Outra questão a ser tratada posteriormente seria a verificação da detectabilidade, de forma que, caso o sistema seja detectável, possa ser realizado o projeto de um observador de estados para este, a fim de se obterem variáveis de estados que sejam de difícil acesso, como a qualidade do vapor.

REFERÊNCIAS

- ABDENNOUR, A. An intelligent supervisory system for drum type boilers during severe disturbances. In: *Electrical Power and Energy Systems*. Saudi Arabia, v. 22, 2000.
- ÅSTRÖM, K. & BELL, R. *Drum-boiler dynamics*. *Automatica*, v. 36, pp. 363-378, 2000.
- BEGA, E. A. *Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras*. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003.
- DELATORE, F. *Controle multivariável em rede de trocadores de calor com bypasses*. 2011. 150 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Modernos*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- FRANCO JR., A. *Projeto e simulação de um sistema de controle via LMIS da produção de vapor de uma caldeira aquatubular*. 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, Ilha Solteira, 2012.
- GONÇALVES, M. G. *Monitoramento e Controle de Processos: Caldeiras*. Apostila. Petrobrás. Rio de Janeiro, 2003.
- GILMAN, G. F. (Jerry). Boiler control systems engineering. In: *ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, 2007.
- HEUSSER, P. A. *Modelling and simulation of boiling channels with a general front tracking approach*. San Diego: Society for Computer Simulation, 1996.
- KWANTNY, H. G. & BERG, J. *Drum level at all loads*, In: Preprints IFAC 12th world congress, v. 3, pp. 405-408, 1993.

LABIBI, B.; MARQUEZ, H. J.; CHEN, T. Decentralized robust pi controller design for an industrial boiler. *Journal of Process Control*, Tehran, v. 19, 2009.

LIU, X.; LARA-ROSANO, F.; CHAN, C. W. Neurofuzzy network modelling and control of steam pressure in 300mw steam-boiler system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Mexico City, v. 16, 2003.

MACIEJOWSKI, M. J. *Multivariable feedback design*. 1. ed. Michigan: Addison-Wesley, 1989.

MARQUES, F. A. P. *Modelagem e controle de nível do tubulão de uma caldeira de vapor aquatubular de uma refinaria de petróleo*. 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado) — Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

MORADI, H.; BAKHTIARI-NEJAD, F. Improving boiler unit performance using an optimum robust minimum-order observer. In: *Energy Conversion and Management*, Tehran, v. 52, 2011.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 4. ed. New York: Prentice Hall, 2003.

PARRY, A., PETETROT, J. F., & VIVIER, M. J. Recent progress in SG level control in french PWR plants. In: *Proceedings of International Conference on boiler dynamics and control in nuclear powerstations* (pp. 81-88). British Nuclear Energy Society, 1995.

PEREIRA, C., SANTÉRIO, E. & LAGEMANN, V. *Geração e Distribuição de Vapor*. Apostila. Petrobrás. Rio de Janeiro, 1993.

ROSHANDEL, A.; RAZMJOU, E. G.; RAHMANI, Z.; SALEHI, S. Robust control of an industrial boiler by using μ synthesis and h_2/h_∞ techniques. In: *Canadian Journal on Automation, Control & Intelligent Systems*, Iran, v. 2, 2011.

SWARNAKAR, A.; MARQUEZ, H. J.; CHEN, T. A new scheme on robust observer based control design for nonlinear interconnected systems with application to an industrial utility boiler. In: *American Control Conference*, 26., 2007.

SILVA, L. & PEREIRA, P. *Caldeiras Aquatubulares*. Apostila. Petrobrás. Rio de Janeiro, 1993.

SODRÉ, Ulysses. *Modelos matemáticos*. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2007.

TAN, W., MARQUEZ, H. & CHEN, T. Multivariable robust controller design for a boiler system. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002.

VALLE, E. A.; DIECK-ASSAD, G. Modeling and simulation of a fuzzy supervisory controller for an industrial boiler. In: *Simulation*, Monterrey, v. 82, 2006.

XU, M.; LI, S.; CAI, W. Cascade generalized predictive control strategy for boiler drum level. In: *ISA Transactions*, Shangai, v. 44, 2005.