

PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE ANTI-SURGE VIA CONTROLE EM CASCATA DO ACIONADOR

MATEUS C. LUCENA* JOÃO B. M. DOS SANTOS† ANTONIO M. N. LIMA†

*Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPgEE/UFCCG

†Departamento de Engenharia Elétrica
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Universidade Federal de Campina Grande

Av. Aprígio Veloso, 882, 58429-970 Campina Grande, PB, Brasil

Email: mateus.lucena@ee.ufcg.edu.br, {joaobatista,amnlima}@dee.ufcg.edu.br

Abstract— The phenomenon of surge is characteristic of centrifugal type compressors. This is characterized by the promotion of oscillations of mass flow and pressure, capable of promoting structural damage and compromising the efficiency of the compression process. To mitigate the phenomenon, this work proposes a law of regulatory control. The design of this law considers the use of cascade structures of the variable speed drive system. The design concept uses the velocity-ramp-up methodology and devises the inclusion of an anti-stress filter in the system speed feedback loop. The proposed control law is evaluated through typical simulation cases.

Keywords— Centrifugal Compressor systems, Phenomenon of Surge, Cascade Control.

Resumo— O fenômeno do surge é característico dos compressores do tipo centrífugo. Este se caracteriza por meio da promoção de oscilações de fluxo de massa e pressão, capazes de promover danos estruturais e comprometer a eficiência do processo de compressão. Para mitigar o fenômeno, este trabalho propõe uma lei de controle regulatório. O projeto desta lei considera a utilização de estruturas em cascata do acionador a velocidade variável do sistema. A concepção de projeto utiliza a metodologia *ramp-up* de velocidade e concebe a inclusão de um filtro anti-surge na malha de realimentação de fluxo de massa do sistema. A lei de controle proposta é avaliada por meio de casos típicos de simulação.

Palavras-chave— Compressores Centrífugos, Fenômeno do Surge, Controle em Cascata.

1 Introdução

Os sistemas de compressão centrífugos são largamente utilizados na indústria petrolífera, cumprindo papel fundamental na manutenção das atividades de exploração de petróleo em plataformas *offshore* (Plucenio et al., 2016). Os sistemas de controle anti-surge típicos utilizam válvulas de circulação para a atmosfera ou de recirculação da descarga para a sucção (de Campos, 2006).

Há também aplicações que utilizam a unidade de acionamento para compor soluções de controle anti-surge (Gravdahl et al., 2002) (Bohagen, 2007). Outrossim, verifica-se ainda a apresentação de soluções mistas que associam as válvulas do sistema ao acionador na composição de estruturas de controle (Torrise et al., 2015), (Lucena et al., 2016).

As soluções de controle anti-surge propostas para o acionador do sistema constituem fundamentalmente leis de regulação. A literatura explícita ainda que estruturas de controle voltadas ao acionador do sistema são tipicamente dispostas em cascata. A utilização destas estruturas apresenta vantagens pois formulam leis capazes de dispensar a utilização da válvula de reciclo presente neste sistemas (Bohagen, 2007), (Lucena et al., 2016).

As soluções anti-surge que utilizam a unidade de acionamento na solução de controle (Bohagen, 2007), (Lucena et al., 2016), (Boinov et al., 2006a) demonstram que o surge é mitigado em uma de

suas vertentes, promovendo-se um acréscimo de velocidade operacional no sistema; que por sua vez aumenta a razão de compressão e expande a região de operação estável do sistema a pontos localizados a esquerda da linha de surge.

Em se tratando do projeto de controladores anti-surge, sejam esses destinados a malhas de controle do acionador ou dedicados ao controle de válvulas presentes no sistema, a literatura apresenta técnicas tradicionalmente revisitadas (Simon and Valavani, 1991), (Gysling et al., 1990), (Billoud et al., 1991), (Krstic et al., 1995), (Liaw and Abed, 1996), (Weigl and Paduano, 1997), (Bartolini et al., 2008), (Asadzadeh and Shabani, 2018), (Boinov et al., 2006b).

Muito embora essas soluções proporcionem maior robustez e desempenho ao sistema, a implementação destas técnicas requer conhecimento teórico avançado, muitas vezes incompatível ao nível de instrução do operador destes sistemas. Tornando inviável a aplicação em cenários de operação industrial já em funcionamento.

Neste sentido, levando em conta a pertinência de agregar o acréscimo de velocidade a solução de controle, e tendo em vista a concepção de uma solução que independa de modelos, enseja-se neste trabalho a formulação de uma malha fechada capaz de operar em *ramp-up* quando da identificação do fenômeno de surge.

A fim de tornar a malha fechada capaz de operar em função da ocorrência de surge propõe-se a

alocação de um filtro anti-surge na malha de realimentação de fluxo de massa do sistema. Nesta oportunidade apresenta-se a concepção e formulação de malha de regulação proposta, bem como os elementos do filtro anti-surge concebido. Este trabalho considera a utilização de um acionador a velocidade variável no sistema.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é apresentada a modelagem do sistema de compressão e o fenômeno do surge; na Seção 3 apresentam-se a estratégia de controle proposta; na Seção 4 seguem os resultados de simulação; na Seção 5 seguem conclusões e concepções de trabalhos futuros.

2 Modelo do Sistema de Compressão

A referencia que da suporte a modelagem apresentada para o sistema de compressão utilizado é proposta em (Egeland and Gravdahl, 2002). A Figura 1 apresenta a ilustração do modelo.

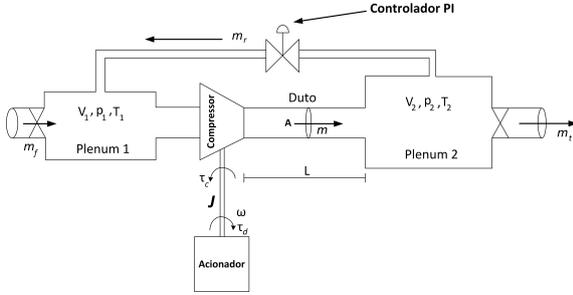


Figura 1: Ilustração do modelo de compressor.

As equações diferenciais que descrevem o modelo são:

$$\dot{p}_1 = \frac{a^2}{V_1}(m_f + m_r - m) \quad (1)$$

$$\dot{p}_2 = \frac{a^2}{V_2}(m - m_r - m_t) \quad (2)$$

$$\dot{m} = \frac{A}{L}(\psi(m, \omega)p_1 - p_2) \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(\tau_d - \tau_c) \quad (4)$$

$$\tau_c = \dot{m}r_2^2\omega\mu. \quad (5)$$

As válvulas são modeladas como um fluxo através de um orifício

$$m_t = Bc_t\sqrt{(p_2 - p_{01})}B \quad (6)$$

$$m_f = c_f\sqrt{(p_{up} - p_1)} \quad (7)$$

$$m_r = c_r\sqrt{(p_2 - p_1)} \quad (8)$$

em que

$$B = \tanh(\zeta(p_2 - p_{01})). \quad (9)$$

O fluxo através das válvulas é controlado por meio das variáveis c_f , c_r e c_t ajustadas entre zero

e 100%. A constante ζ é uma constante característica do sistema. As grandezas envolvidas e suas unidades são explicitadas em (Gravdahl and Egeland, 2012).

O controlador PI da válvula de reciclo funciona em compromisso com o mapa de compressão do sistema, suas linhas de surge (LS) e linha de controle de surge (LCS). A apresentação destas ferramentas está fora do escopo deste trabalho e podem ser encontradas em trabalhos anteriores (Lucena et al., 2016), (Gravdahl et al., 2002), (Bastard, 2010).

2.1 Fenômeno do Surge

Para exemplificar este fenômeno, o cenário de simulação descrito em (Lucena et al., 2016) foi adotado. As oscilações características no fluxo e na pressão apresentadas nas Figuras 2(a) e 2(b) configuram o fenômeno do surge.

As indicações apresentadas na Figura 2(a) ilustram os conceitos de surge moderado e surge profundo. O fenômeno do surge nos compressores centrífugos ocorre quando a vazão do compressor cai abaixo de certo valor, que depende essencialmente do compressor e do tipo de gás que está sendo comprimido. O surge caracteriza-se por uma fase inicial com oscilações de amplitude reduzida (Surge Moderado). Em seguida, passa a reproduzir oscilações de maior amplitude, ocasionando ainda fluxo reverso no sistema (Surge Profundo).

3 Estratégia de Controle

A estrutura de controle proposta neste trabalho admite inclusão no conjunto de soluções que faz uso do controle de velocidade da unidade de acionamento. O sistema de controle apresentado considera portanto a utilização de uma unidade de acionamento a velocidade variável.

3.1 Concepção da Lei de Controle

A concepção apresentada a seguir é formalizada por meio de observações severas e diversos testes de simulação. A escolha de fazer uso de procedimento empíricos é inicialmente adotada em razão das não linearidades do modelo implicarem em procedimentos analíticos custosos.

A fim de explicitar a característica do acréscimo de velocidade enquanto solução de controle, são apresentados na seção 3.1.1 casos de simulação que permitem melhor compreender esta concepção.

Para tornar a malha fechada capaz de operar em função da ocorrência de surge, propõe-se um filtro anti-surge. Tomou-se como decisão de projeto admitir enquanto referência deste filtro a observação do fluxo de massa. Muito embora os

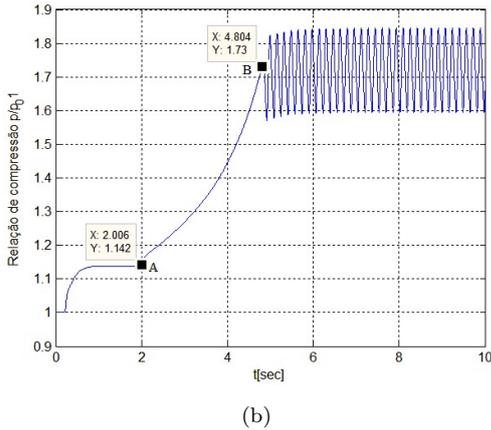
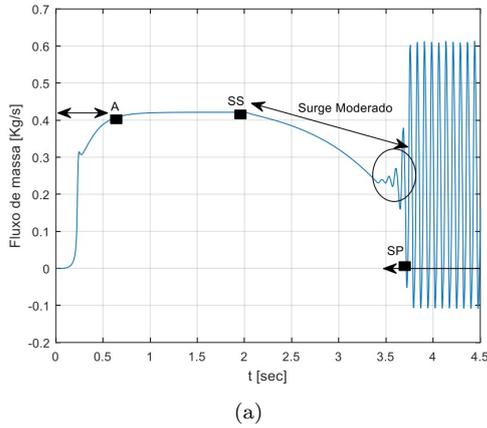


Figura 2: Ciclo de surge.

níveis de pressão do sistema reproduzam características semelhantes, e também possam ser eventualmente arbitrados na qualidade de referência. Esse subsistema é apresentado na seção 3.1.2.

3.1.1 Experimentos a velocidade variável

As simulações realizadas consideram a saída de um controlador PI enquanto torque idealizado da unidade de acionamento do sistema. No cenário adotado, o surge é provocado por meio do estrangulamento da válvula de admissão do sistema a partir de 2 segundos. Os resultados observados são apresentados na Figura 3; as ações impostas manualmente são identificadas em sua legenda.

As mudanças de velocidade são experimentadas após início das oscilações do surge (aproximadamente 6 segundos). São adotados diferentes referenciais de velocidade, caracterizando distintos degraus de velocidade no sistema. Observa-se que a identificação do limiar de velocidade que deve ser atingido para cessar as oscilações não é facilmente concebível.

Conclui-se que a identificação do nível de velocidade a ser atingido para cessar as oscilações do surge é função do ponto de operação do sistema; muito embora estes níveis possam ser identificados por meio de severas experimentações, esta prática

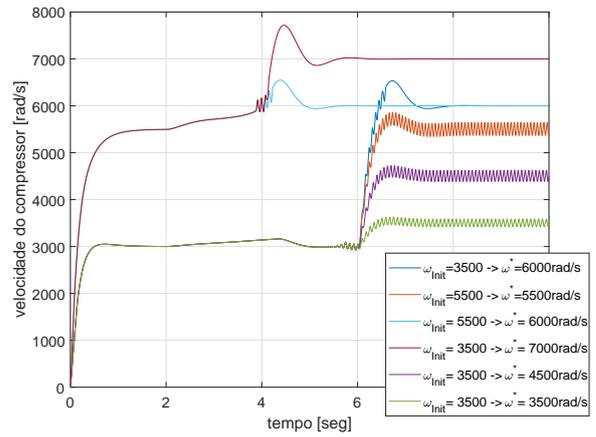


Figura 3: Sinais de velocidade do experimento a velocidade variável.

inviabiliza a formulação de leis de controle de cunho geral.

De posse destas informações defende-se neste trabalho uma estratégia que permita elevar a referência de velocidade do sistema na forma de rampa até que as oscilações do surge cessem. Para identificar os instantes adequados a este tipo de ação, propõe-se o filtro anti-surge apresentado na sequência.

3.1.2 Filtro anti-surge

Para fornecer uma rampa de velocidade através unidade de acionamento, se faz necessário utilizar estruturas que promovam uma ação de rampa na referência do controlador de velocidade, tão somente durante as oscilações de surge. Em compromisso com estes objetivos propõe-se a estrutura apresentada na Figura 4.

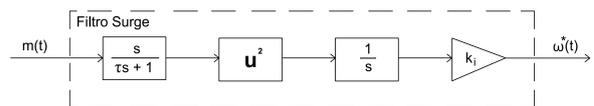


Figura 4: Diagrama de blocos do filtro anti-surge.

Esta estrutura é capaz de produzir referências de velocidade adequadas em função do sinal de fluxo de massa do sistema. A estrutura proposta, doravante filtro anti-surge, sintetiza uma cascata de filtros, sejam estes respectivamente: filtro derivativo, quadrático e integrador.

Para demonstrar as ações do filtro anti-surge em detalhes, a Figura 4 exibe o comportamento dos sinais antepostos a saída em um caso de simulação. Antes do ponto A é reproduzida a dinâmica transitória da unidade de acionamento. No ponto B, o surge é provocado por meio da estrangulação da válvula de admissão do sistema (equação 7). Na sequência, observa-se as características do surge nos sinais.

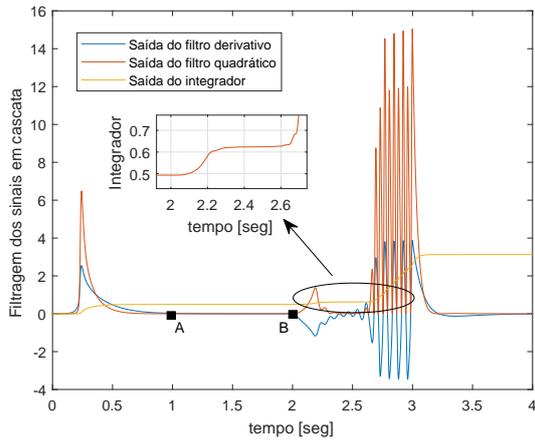


Figura 5: Sinais do filtro anti-surge.

O objetivo do filtro anti-surge é somar as áreas reproduzidas durante as oscilações do surge a fim de produzir uma rampa de velocidade.

A ação derivativa produz um sinal aproximadamente zero quando o fluxo é aproximadamente constante. Durante o surge, as oscilações com fluxo reverso são notadamente reproduzidas.

Neste contexto, a soma de áreas negativas reduziria a referência de velocidade, o que não é desejado. Para evitar essa característica, é alocada em série uma função quadrática, as oscilações são então reproduzidas com valores positivos apenas.

Após o filtro quadrático, aloca-se um integrador com ganho (k_i). O integrador é responsável por fornecer a rampa de velocidade enquanto as oscilações ocorrem.

O ganho (k_i) é aplicado para adequar os universos de discurso ($kg/s \rightarrow rad/s$). A determinação dos parâmetros envolvidos no filtro anti-surge é explicada em detalhes na seção 3.3.

3.2 Lei de Controle

O controle anti-surge proposto constitui uma lei de realimentação que regula os níveis de velocidade da máquina em compromisso com os padrões de comportamento do sinal de fluxo do sistema. O diagrama de blocos da estratégia é apresentado na Figura 6.

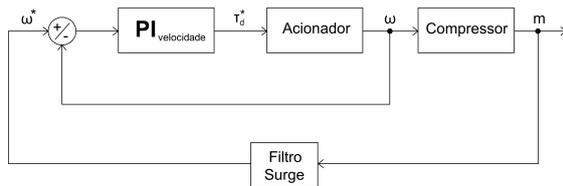


Figura 6: Lei de regulação anti-surge.

Esta proposição considera um acionador ideal a velocidade variável. O sinal de saída do controlador de velocidade (u) impõe a referência de

conjugado para o acionador do sistema, i.e.

$$\tau_d = u \quad (10)$$

A malha interna é composta por um simples controlador PI, responsável por efetuar o rastreamento assintótico do sinal de erro de velocidade, conforme explicitado nas equações 11 e 12.

$$u = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \cdot e \quad (11)$$

$$e = \omega^* - \omega \quad (12)$$

A malha externa da estratégia compõe uma lei de realimentação, fornecendo referencial de velocidade por meio do filtro anti-surge apresentado. As estruturas matemáticas que descrevem o filtro anti-surge são explicitadas nas equações 13, 14 e 15.

$$\omega^*(m) = \delta_d[f(m)] \cdot \frac{k_i}{s} \quad (13)$$

$$\delta_d[f(m)] = [f(m)]^2 \quad (14)$$

$$f(m) = \left(\frac{s}{\tau s + 1}\right) \cdot m \quad (15)$$

Esta lei fundamenta notadamente um problema de regulação em função do fluxo de massa.

3.3 Projeto da Lei de Controle

Nesta subseção são apresentados os desenvolvimentos que justificam a determinação dos ganhos presentes na Lei de Controle. É discutida inicialmente a introdução de um ganho de rastreo k_t em compromisso com o chaveamento suave requerido pela estratégia; em seguida justificam-se a escolha do ganho k_i e da constante τ , advindas do 'filtro anti-surge' proposto. Por último são tecidos comentários pertinentes quanto a sintonia do controlador de velocidade do sistema.

Para utilização da lei de regulação proposta se faz necessário definir uma velocidade inicial de referência, e só após a estabilização do sistema é que ativa-se a abordagem. Isso ocorre em razão do filtro anti-surge proposto traduzir o transitório de acionamento inicial do sistema (ver Figura 5), indesejável para a aplicação proposta.

A Figura 7 apresenta o diagrama de ativação proposto. Uma vez que a velocidade do sistema atinge regime permanente a chave S1 é modificada da posição A para a posição B, alocando a lei de regulação na malha fechada, de modo a compor o controle ativo do sistema.

O subsistema CAS (Controle Anti-Surge) sintetiza uma estrutura capaz de manipular variáveis auxiliares, e.g. chave S1, em ordem de auxiliar a estratégia de controle.

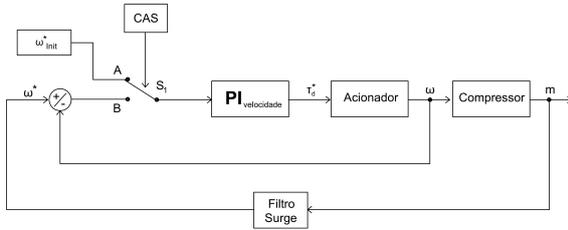


Figura 7: Diagrama de ativação da lei de controle.

1. Chaveamento suave

Para fornecer uma transferência ininterrupta durante a ativação da malha de realimentação externa, utiliza-se um ganho k_t para rastrear a referência inicial de velocidade adotada. A Figura 8 apresenta a configuração empregada nesta estrutura. Esse ganho é definido em compromisso com o quão rápido se deseja chavear a estratégia. Para o modelo adotado, verificamos que um simples ganho unitário é capaz de fornecer chaveamento suave em tempo suficientemente adequado.

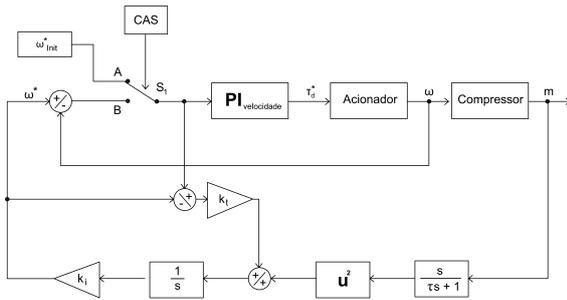


Figura 8: Diagrama de ativação com ganho de rastreo.

2. Filtro surge

Para alcançar os objetivos da estratégia proposta, é sugerido definir o ganho k_i com o mesmo valor de referência inicial de velocidade (ω^*) adotado. Isso advém da necessidade de adequar o nível do sinal de controle advindo do filtro anti-surto com a velocidade ω^* .

A constante τ é definida em compromisso com o quão rápido se deseja ajustar a ação derivativa. Notadamente, esta escolha afeta diretamente o desempenho do filtro anti-surto. Em aplicações semelhantes, esta constante é *a priori* definida empiricamente. Para o modelo adotado, verificou-se que valores ao redor de 0,2 sintetizam uma boa aproximação.

3. Controlador de velocidade

A sintonia do controlador de velocidade pode ser efetivada por meio de técnicas clássicas

apresentadas na literatura e.g. (Hang et al., 1991), (Skogestad, 2003).

Destaca-se que sintonias menos agressivas são desejáveis no contexto desta aplicação. Desta forma, evitam-se eventuais *overshoots* de velocidade, reduzindo assim as demandas energéticas do sistema.

É adequado destacar que essa estrutura, como outras estruturas em cascata, precisa ser ajustada de dentro para fora. Isso significa que é necessário ajusta inicialmente o controlador de velocidade, e em seguida, definir e ajustar os demais ganhos da estrutura.

4 Avaliação da Estratégia Proposta

Os resultados de simulação apresentados neste trabalho utilizam os parâmetros ambientais e do compressor listados em Bastard(2010). Em compromisso com o espaço deste trabalho, são apresentados a seguir avaliações referente a dois casos típicos de simulação.

Em ambos os casos de simulação, o surge é provocado através da estrangulação da válvula de admissão do sistema m_f (ver equação 7); iniciado a regulação no ponto **A**, aos 4 segundos de simulação.

No caso de simulação 1, realiza-se um estrangulamento em rampa suave na válvula de admissão. No caso de simulação 2, é promovido um estrangulamento na forma de degrau.

Estes cenários são apresentados ensejando emular perturbações severas (degrau), que promovem o surge repentinamente, e tênues (rampa), que acarretam surge quando impostas continuamente ao sistema.

O objetivo destas simulações é analisar o comportamento do sistema frente a ação de controle promovida por meio da estratégia apresentada.

A fim de explicitar o efeito da ação de controle proposta, em ambos os casos de simulação, os resultados são apresentados em contraste com o cenário do controlador de velocidade com referência constante definido por Bastard(2010).

Os parâmetros utilizados para ambos os casos de simulação são apresentados na Tabela 1. A definição destes parâmetros é efetivada de acordo com a argumentação disposta na seção 3.3.

Tabela 1: Parâmetros da estrutura de controle.

Parâmetros	Valor
K_{pw}	1
K_{iw}	5
C_{nc}	$1 \cdot 10^{-3} Nm.s/rad$
k_i	$2709 rad/kg$
k_t	3
τ	0.2

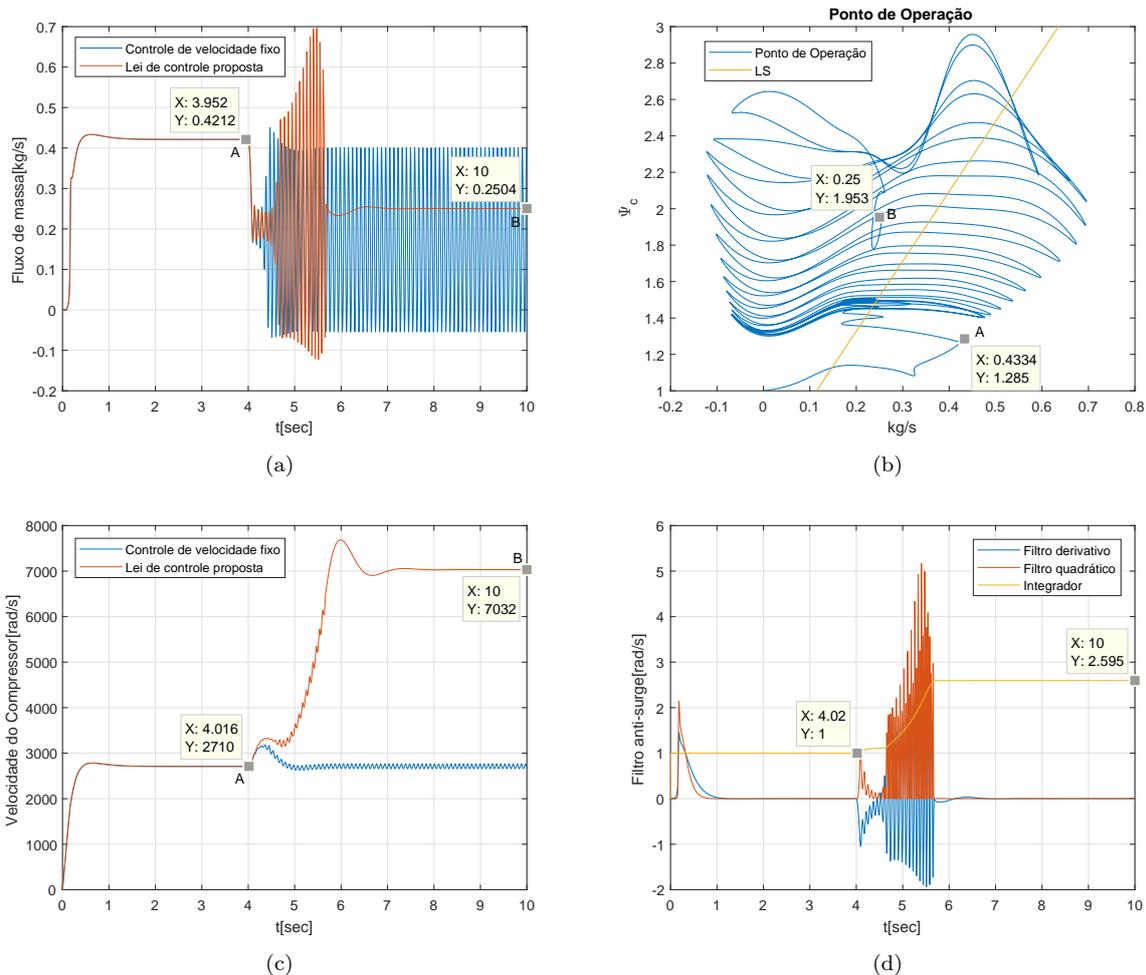


Figura 9: Caso de simulação 1.

- **Caso de simulação 1:** O surge promove acréscimo de velocidade involuntário mesmo no sistema sob controle de velocidade [Lei de controle - Figura 9(c)].

Observa-se que inicialmente o sistema tenta operar em um novo ponto de operação, no entanto, as oscilações do surge persistem e a lei de controle promove o *ramp-up* de velocidade necessário para mitigar o fenômeno. O cessar das oscilações é confirmado observando-se o fluxo de massa do sistema [Controle de velocidade fixo - Figura 9 (a)].

Em contraste, observa-se o sistema sob controle de velocidade fixo [Figura 9(c)]. O controle de velocidade mantém a referência fixada, porém opera em regime de surge.

- **Caso de simulação 2:** O cenário em que a perturbação que provoca o surge é promovido de maneira tênue explícita que, o sistema tenta operar em baixa velocidade muito embora um acréscimo de velocidade promovido inicialmente reduza a amplitude das oscilações; identificado que este acréscimo é insuficiente, o sistema entra em *ramp-up* de veloci-

dade até cessar as oscilações do surge [Lei de Controle - Figura 10(c)].

O cessar das oscilações é verificado observando-se o fluxo de massa do sistema [Figura 10(a)].

Em contraste, o controle de velocidade fixo mantém a referência inicialmente adotada, retardando notadamente o regime de surge, muito embora o sistema alcance o surge profundo na sequência [Controle de velocidade fixo - Figura 10(c)].

Em ambos os casos observa-se que a estratégia anti-surge proposta promove elevação da razão de compressão do sistema [Figuras 9(b) e 10(b)].

A saída do sinal integrador presente nas Figuras 9(d) 10(d) explicita que para cessar as oscilações do surge partindo de um ponto que opera inicialmente a $\omega = 2709\text{rad/s}$, se faz necessário impor uma reprodução de velocidade 2,59 vezes maior, independente do formato de perturbação promovido no sistema.

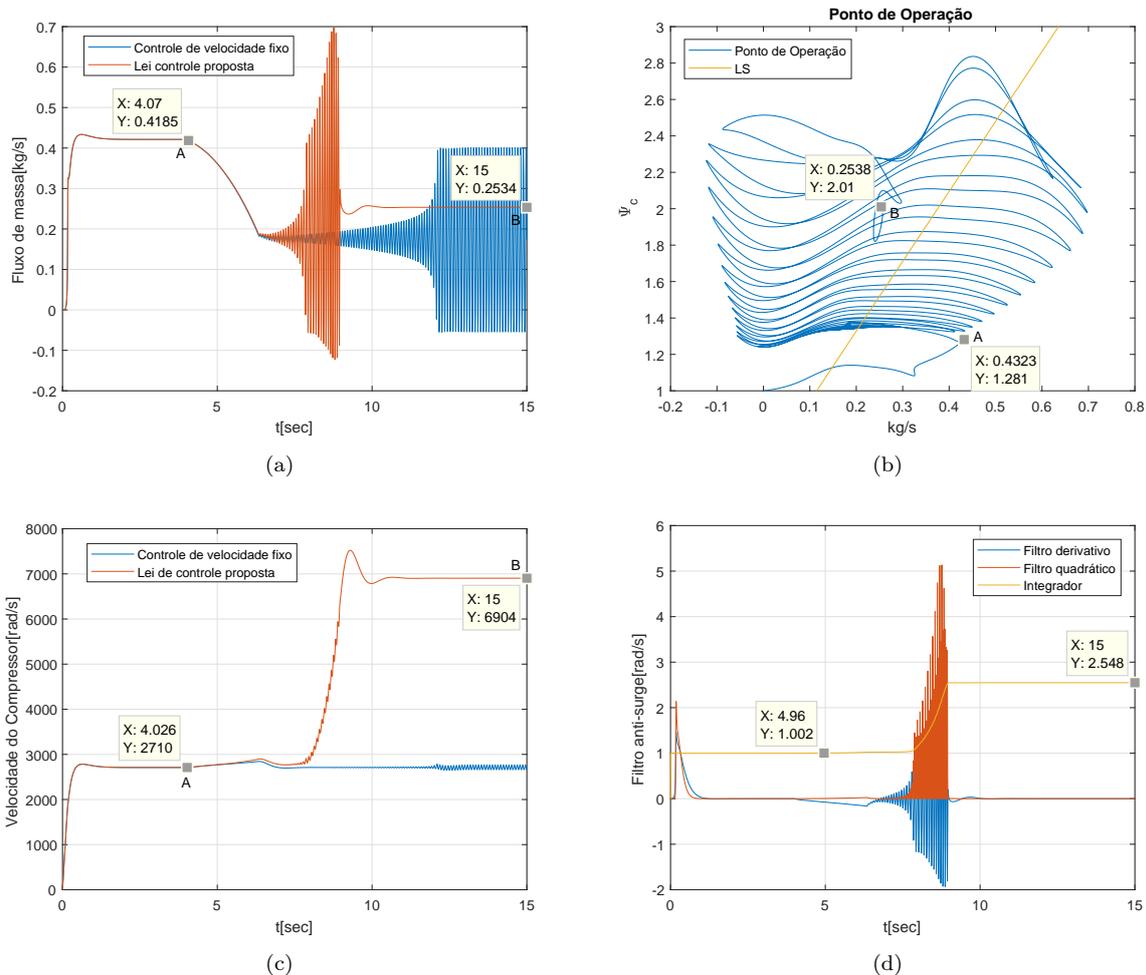


Figura 10: Caso de simulação 2.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou a concepção de uma lei de regulação anti-surge para o acionador a velocidade variável do sistema em estudo. Nesta oportunidade apresentou-se também a concepção de um filtro anti-surge para a malha de realimentação do sistema.

As análises apresentadas evidenciaram a mitigação do surge quando da utilização da lei de controle proposta. Estas constatações são apoiadas por casos de simulação típicos destes sistemas.

A análise formal da estabilidade do sistema frente as estratégias de controle apresentadas é passível de fundamentação segundo os critérios de estabilidade de Lyapunov para sistemas não lineares. Estes desenvolvimentos são tema de trabalhos futuros.

Agradecimentos

Ao Programa da ANP PRH-42, PPgEE-COPELE e a CAPES pelo suporte necessário a realização do trabalho.

Referências

- Asadzadeh, M. A. and Shabani, F. (2018). Centrifugal compressor active surge controller design based on fuzzy type ii, *2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, pp. 1–6.
- Bartolini, G., Muntoni, A., Pisano, A. and Usai, E. (2008). Compressor surge suppression by second-order sliding mode control technique, *IFAC Proceedings Volumes* **41**(2): 6238–6244.
- Bastard, B. O. (2010). *The compressor recycle system*, Master's thesis, NTNU.
- Billoud, G., Galland, M. A., Huu, C. H. and Candel, S. (1991). Adaptive active control of instabilities, *Journal of intelligent material systems and structures* **2**(4): 457–471.
- Bohagen, B. (2007). *Active surge control of centrifugal compression systems*, PhD thesis, PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Boinov, K. O., Lomonova, E. A., Vandenput, A. J. A. and Tyagunov, A. (2006a). Surge con-

- trol of the electrically driven centrifugal compressor, *IEEE Transactions on Industry Applications* **42**(6): 1523–1531.
- Boinov, K. O., Lomonova, E. A., Vandenput, A. J. and Tyagunov, A. (2006b). Surge control of the electrically driven centrifugal compressor, *IEEE Transactions on Industry Applications* **42**(6): 1523–1531.
- de Campos, Mario Cesar M Massa e Teixeira, H. C. (2006). *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*, Edgard Blücher.
- Egeland, O. and Gravdahl, J. T. (2002). *Modeling and simulation for automatic control*, Vol. 76, Marine Cybernetics Trondheim, Norway.
- Gravdahl, J. T. and Egeland, O. (2012). *Compressor surge and rotating stall: modeling and control*, Springer Science and Business Media.
- Gravdahl, J. T., Egeland, O. and Vatland, S. O. (2002). Drive torque actuation in active surge control of centrifugal compressors, *Automatica* **38**(11): 1881–1893.
- Gysling, D. L., Dugundji, J., Greitzer, E. and Epstein, A. (1990). Dynamic control of centrifugal compressor surge using tailored structures, *ASME 1990 international gas turbine and aeroengine congress and exposition*, American Society of Mechanical Engineers, pp. V001T01A031–V001T01A031.
- Hang, C. C., Åström, K. J. and Ho, W. K. (1991). Refinements of the ziegler–nichols tuning formula, *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*, Vol. 138, IET, pp. 111–118.
- Krstic, M., Protz, J., Paduano, J. and Kokotovic, P. (1995). Backstepping designs for jet engine stall and surge control, *Decision and Control, 1995., Proceedings of the 34th IEEE Conference on*, Vol. 3, IEEE, pp. 3049–3055.
- Liaw, D.-C. and Abed, E. H. (1996). Active control of compressor stall inception: a bifurcation-theoretic approach, *Automatica* **32**(1): 109–115.
- Lucena, M. C., dos Santos, J. B. M. and Lima, A. M. N. (2016). Mitigacao de surge e sistemas de controle em cascata de compressores centrifugos, *XXI Congresso Brasileiro de Automatica (CBA 2016)*, UFES, Vitoria - ES, pp. 1866–1871.
- Plucenio, A., Vettorazo, C., Picon, B., Campos, M. M. and Lima, M. (2016). Modeling and control of an oil platform gas compression station, *XXI Congresso Brasileiro de Automatica (CBA 2016)*, UFES, Vitoria - ES.
- Simon, J. and Valavani, L. (1991). A lyapunov based nonlinear control scheme for stabilizing a basic compression system using a close-coupled control valve, *American Control Conference, 1991*, IEEE, pp. 2398–2406.
- Skogestad, S. (2003). Simple analytic rules for model reduction and pid controller tuning, *Journal of process control* **13**(4): 291–309.
- Torrise, G., Jaramillo, V., Ottewill, J. R., Mariethoz, S., Morari, M. and Smith, R. S. (2015). Active surge control of electrically driven centrifugal compressors, *Control Conference (ECC), 2015 European*, IEEE, pp. 1614–1619.
- Weigl, H. and Paduano, J. (1997). Application of h-infinity control with eigenvalue perturbations to stabilize a transonic compressor, *IEEE International Conference on Control Applications, Hartford, Oct*, pp. 5–7.