

PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE *FUZZY* ANTI-SURGE PARA ACIONADOR DE SISTEMAS DE COMPRESSÃO CENTRÍFUGOS

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

**Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPqEE/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 model of the centrifugal compression systems is represented by nonlinear differential equations, such that characteristics establish a complex control solution. In this work we propose to explore the basic understanding of the dynamics system to find simpler solutions with the purpose of facilitating the design of control systems. In this opportunity, is proposed fuzzy design methodologies to use in cascade control structures on the drive control loop. The proposed control structures consider the use of a variable speed drive and the availability of the recycle valve commonly found in these systems. In time, the control structure presented is revisited in order to suggest new project strategies. These structures provide the mitigation of the surge phenomena.

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

Resumo— O modelo dos sistemas de compressão centrífugos é representado por meio de equações diferenciais não lineares, de modo que suas características estabelecem uma solução de controle complexa. Neste trabalho propõe-se explorar o entendimento básico da dinâmica do sistema para encontrar soluções mais simples com o propósito de facilitar o projeto dos sistemas de controle. Nesta oportunidade propõe-se metodologias de projeto *fuzzy* para a utilização de estruturas de controle em cascata do acionador. A estrutura de controle utilizada considera a utilização de um acionador a velocidade variável ideal e a disponibilidade da válvula de reciclo comumente encontradas nestes sistemas. A concepção de projeto proposta contempla a mitigação do fenômeno do surge. Em tempo, revisita-se ainda a estrutura de controle em estudo para sugerir novas estratégias de projeto.

Palavras-chave— Compressores Centrífugos, Fenômeno do Surge, Controle Fuzzy Anti-Surge.

1 Introdução

Os compressores do tipo centrífugos estão sujeitos a apresentar o fenômeno do surge em virtude das características construtivas inerentes ao seu funcionamento. Associa-se a ocorrência desse fenômeno também, a variabilidade operacional sob a qual esses equipamentos são tipicamente submetidos. Em síntese, o surge é caracterizado por oscilações de pressão e fluxo de massa que conferem forte vibração ao sistema, comprometendo a eficiência do processo de compressão e ocasionando eventuais danos estruturais.

Os sistemas de controle anti-surge típicos da indústria petrolífera (cenário de aplicação) utilizam válvulas de circulação para a atmosfera ou de recirculação da descarga para a sucção (de Campos, 2006). No entanto, a redução da atividade de recirculação e/ou ejeção de gases para queima no *flare* traduz melhor desempenho e maior eficiência a esses sistemas. Nesse contexto há também aplicações que exploram a utilização da unidade de acionamento para composição dos sistemas de controle anti-surge (Gravdahl et al., 2002), (Bohagen, 2007), (Torrise et al., 2015).

A literatura explicita vários métodos para projetar controladores anti-surge, sejam eles destinados a malhas de controle do acionador ou dedicados ao controle de válvulas presentes no sistema.

Uma vez que o problema é de natureza não-linear, o uso de técnicas não-lineares é recorrente, muito embora estruturas lineares representem parte importante das soluções apresentadas. Isso pode ser verificado observando-se as técnicas de controle tipicamente revisitadas em aplicações anti-surge (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).

As soluções de controle propostas para o acionador do sistema constituem fundamentalmente malhas em cascata para regulação de velocidade do sistema (Lucena et al., 2016). Uma fragilidade eminente dessas estruturas, em se tratando de aplicações destinadas a sistemas não lineares, é a determinação dos parâmetros de projeto. Estruturas em cascata aumentam o número de parâmetros por determinar, aumentando a quantidade de eventuais formalizações requeridas e a complexidade da solução.

A fim de facilitar o projeto de controladores destas estruturas esse trabalho propõe uma modelagem *fuzzy* para a malha mestre do acionador. Em tempo, revisita-se ainda a estrutura de controle apresentada por (Lucena et al., 2016) para sugerir novas estratégias de projeto. Considera-se pertinente destacar ainda que o estudo apre-

sentado 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 as metodologias de projeto propostas e as estruturas de controle utilizadas; na Seção 4 seguem os resultados de simulação; na Seção 5 seguem conclusões e comentários acerca de trabalho futuros.

2 Modelo do Sistema de Compressão

O modelo do sistema de compressão utilizado é inicialmente apresentado por (Gravdahl et al., 2002) e revisitado mais tarde por (Bastard, 2010). O sistema de compressão utilizado segue na Figura 1.

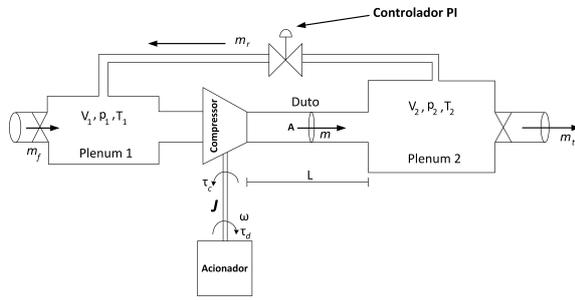


Figura 1: Ilustração do sistema de compressão.

As equações diferenciais que descrevem este sistema são dadas por

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

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

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

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

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

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 característica do sistema. As grandezas envolvidas e suas unidades são explicitadas em (Gravdahl and Egeland, 2012).

As grandezas envolvidas e suas unidades são dados por,

m - Fluxo de massa do compressor [kg/s]

m_t - Vazão mássica na válvula de exaustão [kg/s]

m_r - Vazão mássica na válvula de reciclo [kg/s]

m_f - Vazão mássica na válvula de admissão [kg/s]

a - Velocidade sônica [m/s]

A - Area do olho do impelidor (referência) [m²]

L_c - Comprimento do duto do compressor [m]

p_1 - Pressão no plenum 1 [Pa]

p_2 - Pressão no plenum 2 [Pa]

V_1 - Volume no plenum 1 [m³]

V_2 - Volume no plenum 2 [m³]

ψ - Razão de compressão

J - Momento de inércia [kg.m²]

τ_d - Torque de acionamento [N.m]

τ_c - Torque do compressor [N.m]

ω - Velocidade angular eixo do compressor [rad/s]

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 o fenômeno do surge, o cenário de simulação descrito em (Lucena et al., 2016) foi adotado. As oscilações características no fluxo e na pressão apresentadas nas Figuras 5(a) e 5(b) configuram o fenômeno do surge. A ilustração apresentada na Figura 5(a) fundamenta as variáveis linguísticas **SS** (Sem Surge) e **SP** (Surge Profundo) utilizadas na Seção 3.2 deste documento.

3 Metodologias de Projeto

O surge é evitado tipicamente por meio de estratégias que mantêm o ponto de operação do compressor fora da região de incidência do fenômeno. O controle de surge mais utilizado é feito através da válvula de reciclo do sistema (Bastard, 2010). No entanto, esses métodos limitam a faixa de operação do acionador e restringem a eficiência do sistema. O estudo apresentado por (Torrissi et al., 2015) exhibe uma tendência atual em associar a unidade de acionamento e a válvula de reciclo na construção de novas leis de controle para esses sistemas.

3.1 Controle em Cascata

A estrutura de controle utilizada é apresentada no diagrama de blocos da Figura 3. O diagrama explicita uma proposta que utiliza tanto o controle ativo do acionador quanto a válvula de reciclo do

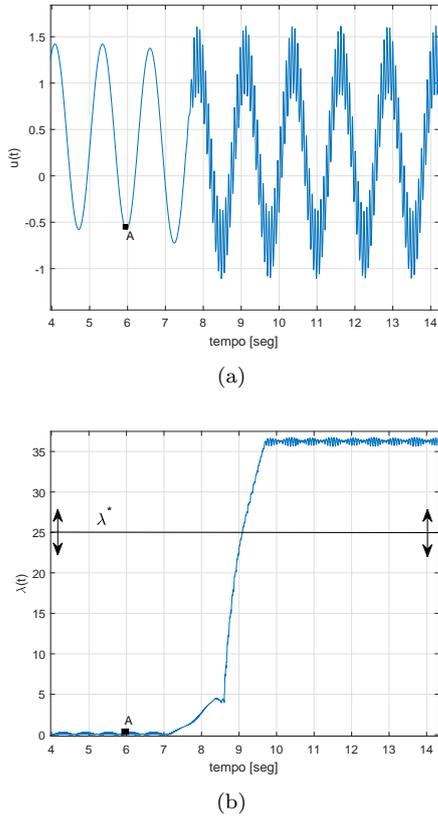


Figura 5: Sinais da técnica da detecção de surge.

custosos. O procedimento formalizado a seguir foi verificado por meio de observações severas a diversos testes de simulação. Esses procedimentos compõem por sua vez um conjunto de simples instruções que facilitam o emprego da estrutura de controle em cascata apresentada.

As etapas procedurais apresentadas a seguir devem ser executadas em sequência:

1. Nesta etapa deve ocorrer a sintonia do controlador mais interno (controlador de velocidade). A sintonia deste controlador pode ser efetivada por meio de técnicas clássicas apresentadas na literatura e.g. (Hang et al., 1991)(Skogestad, 2003).

Adicionalmente, ressalva-se que a sintonia obtida anteriormente deve ser escalonada haja vista uma dinâmica de alocação de polos: até duas vezes mais lenta, em termos do ganho K_p ; e até seis vezes mais lenta, em termos do ganho K_i . A proporção apresentada é passível de aplicação ao considerar uma sintonia inicial sem *overshoot*. Esse escalonamento de ganhos é proposto em compromisso com o objetivo de mitigação do surge.

2. A malha externa deve ser ajustada observando o comportamento do sistema em modo automático. A sugestão procedural de ajuste é zerar o ganho integral em questão e elevar o ganho proporcional até lograr uma sintonia

que proporcione o funcionamento estável do sistema de controle em cascata. O ganho integral pode ser utilizado posteriormente para ajustar respostas transitórias.

3.2 Controle Fuzzy em Cascata

A motivação para utilização desta abordagem advém da averiguação de desenvolvimentos matemáticos custosos, ou muito complexos para serem considerados.

Um controlador baseado em lógica *fuzzy* propõe modelar as ações de controle a partir da formulação adequada do conhecimento especialista, ao invés de, necessariamente, modelar o processo em si (Chen and Pham, 2000).

O controlador *fuzzy* em cascata proposto compõe a malha de controle do acionador (Figura 6). A estratégia proposta faz uso do coeficiente de relação ($\delta_m(kh)$) estabelecido em (Lucena et al., 2016). Nesse contexto, em compromisso com a modelagem do conhecimento especialista, o controlador *fuzzy* é responsável por fornecer referências de velocidade operacional adequadas ao funcionamento estável do sistema.

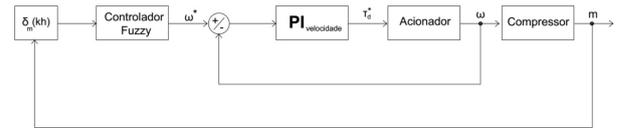


Figura 6: Diagrama de blocos do controle fuzzy em cascata.

3.2.1 Modelagem do Conhecimento Especialista

As funções de pertinência da parte antecedente das regras (referentes ao conjunto fuzzy de entrada), bem como da parte consequente da base de regras (conjunto fuzzy de saída), são mostradas na Figura 7.

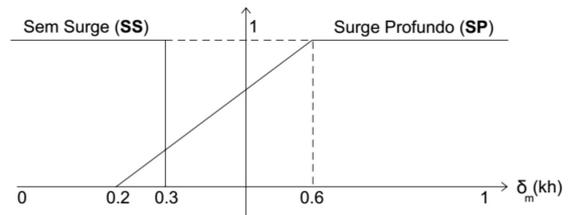


Figura 7: Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* de entrada saída.

Baseado em conhecimento prévio sobre o procedimento de estabilização do sistema de compressão em estudo, construiu-se o vetor apresentado na Tabela 1, que contempla as regras do controlador fuzzy.

Tabela 1: Vetor de regras do controlador *fuzzy*.

$\delta_m(kh)$	
SS	SP
$\omega_{fuzzy}^* = SS$	$\omega_{fuzzy}^* = SP$

As funções de pertinência apresentadas para o controlador fuzzy proposto levam em consideração as variáveis linguísticas denominadas: Sem Surge e Surge Profundo, doravante **SS** e **SP**, respectivamente.

A necessidade de manter uma velocidade constante e em níveis aceitáveis segundo conhecimento especialista, leva a formular a função de pertinência apresentada para o conjunto *fuzzy* **SS** (Figura 7). Para valores de $\delta_m(kh) < 0,2$ o sistema encontra-se estável e sem apresentar indícios de surge. Desse modo, é necessário manter uma velocidade constante em níveis definidos pelo operador.

Baseado em conhecimento especialista, para valores de $\delta_m(kh) > 0,2$ é levantada a hipótese de surge. Nesse sentido se faz necessário utilizar uma função de pertinência que retrate de forma suave o acréscimo de velocidade requerido pelo acionador para mitigar possíveis perturbações. De maneira semelhante ao modo de operação **SS**, a operação em **SP** demanda também um fator que promova um limiar de velocidade constante a ser alcançado. Deste modo, o formato formulado para o conjunto *fuzzy* **SP** (Figura 7) permite mitigar o fenômeno do surge e ainda evitar possíveis *trips* de sobrevelocidade. Fundamentalmente, esta característica representa uma vantagem do controlador *fuzzy* frente a sintonia de controladores convencionais, que por vezes demandam velocidade impraticáveis do acionador.

O intervalo $0,2 < \delta_m(kh) < 0,3$ de interseção entre os conjuntos reflete as nuances da técnica de detecção de surge, que por sua vez promove uma transição suave em um intervalo de tempo suficiente para confirmação, ou não, do fenômeno do surge. Essa interseção é necessária e justificada em razão da característica de surge moderado destacada na Figura 5(a). A atribuição das regras indicadas na Figura 1 também pode ser aferida observando-se as indicações da Figura 5(a).

4 Avaliação das Metodologias Propostas

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, apresenta-se a seguir a avaliação referente a modelagem *fuzzy* disposta na seção 3.2. A avaliação das metodologias propostas para as estruturas em cascata de pressão e vazão (seção 3.1.2) são apresentadas em (Lucena et al., 2016).

4.1 Controle Fuzzy em cascata

O controlador *fuzzy* projetado utiliza o modelo Mandani. O método de defuzzificação utilizado é o método do centro de área (CDA). O procedimento de defuzzificação envolve um ganho multiplicador, denominado K_{fuzzy} , que deve ser inserido afim de adequar corretamente os valores advindos do universo *fuzzy*, ao universo de discurso real da variável de controle. Este ganho é quantificado empiricamente, de modo a considerar que uma boa aproximação gira em torno do valor apresentado. Os parâmetros dos controladores utilizados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros dos Controladores

Parâmetros	Valor
K_{pw}	$2Nm.s/rad$
K_{iw}	$12Nm.s/rad$
C_{nc}	$1 \cdot 10^{-3}$
K_{fuzzy}	$15000rad/s$

Para utilização do controle ativo *fuzzy* proposto (ver Figura 6) 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 coeficiente de variação traduzir o transitório de acionamento inicial do sistema, indesejável para a aplicação proposta. A utilização da abordagem *fuzzy* dispensa o reset periódico do coeficiente de variação $\delta_m(kh)$ definido em (Lucena et al., 2016).

A Figura 8 apresenta o diagrama de ativação proposto. Em 5 segundos a chave S1 é modificada da posição A para a posição B, alocando o controlador *fuzzy* na malha fechada de modo a compor o controle ativo do sistema.

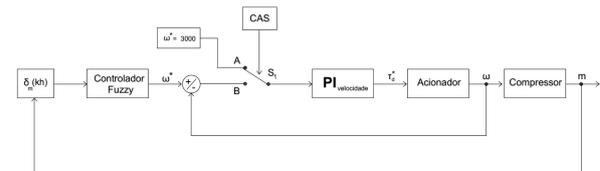


Figura 8: Diagrama de ativação do controlador *fuzzy*.

A partir de 10 segundos o surge é provocado no sistema e o controlador *fuzzy* responde aumentando gradualmente a velocidade operacional do sistema. Contudo, esse aumento de velocidade não é suficiente para conter os níveis de surge com oscilações reversas. Deste modo, uma vez identificada as oscilações, o controlador fuzzy impõe um aumento de velocidade suficientemente alto para cessar as oscilações características do surge [ver Figura 9(c)].

Os resultados apresentados explicitam que a ação do controlador *fuzzy* promove uma elevação da razão de compressão [Figura 9(d)], promovendo

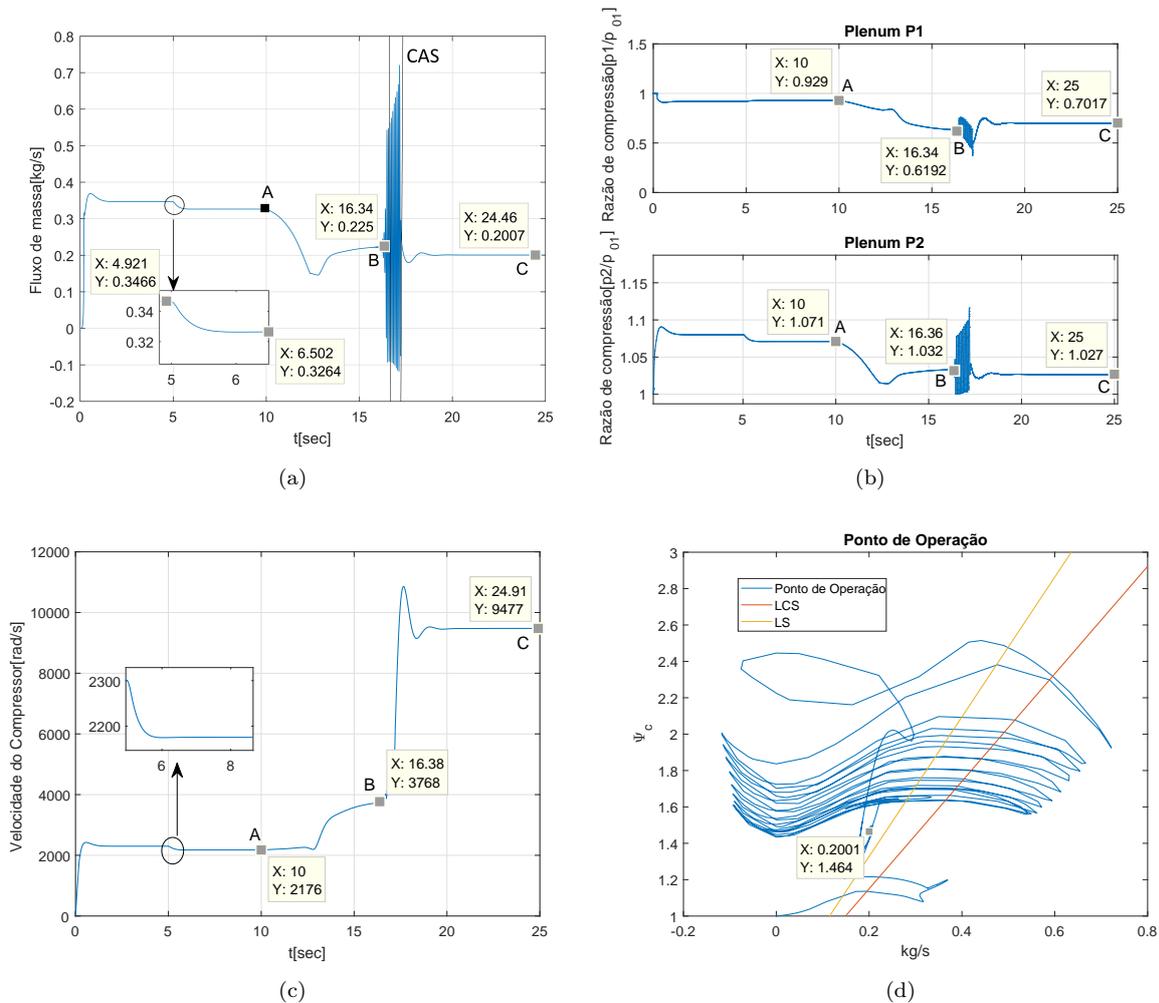


Figura 9: Ação do Controle *Fuzzy* em Cascata.

a operação estável do sistema a esquerda da linha de surge e sob fluxo de massa reduzido.

A válvula de reciclo do sistema não foi acionada no cenário de simulação apresentado. O sinal de controle destacado na Figura 9(a) indica o momento em que o CAS acionaria a válvula de reciclo, explicitando assim a capacidade da estratégia *fuzzy* apresentada de dispensar a utilização desta válvula.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O entendimento básico da dinâmica do sistema proporcionou o modelamento *fuzzy* e a formalização do procedimento de sintonia heurístico apresentado. Nesse contexto, evidenciou-se a mitigação do surge por meio de estruturas simples, facilitando assim o projeto dos sistemas de controle associados.

Os resultados apresentados evidenciaram características importantes do controle *fuzzy* em cascata ativo do acionador frente ao fenômeno do surge, e.g. suave transição entre diferentes níveis de velocidade operacional, reconhecimento de diferentes níveis de intensidade de surge provocados,

mitigação do fenômeno em casos críticos sem utilização da válvula de reciclo do sistema e limitação de velocidade operacional evitando o ocasionamento de *trips* de sobrevelocidade.

As constatações relatadas são apoiadas pelos casos de simulação apresentados. 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.
- Chen, G. and Pham, T. T. (2000). *Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems*, CRC press.
- de Campos, Mario Cesar M Massa e Teixeira, H. C. (2006). *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*, Edgard Blücher.
- 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.
- 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.