

ANÁLISE DE TRANSIENTES EM LINHAS PARA ALTO-FORNO

Angela Ourivio Nieckele

Departamento de Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro
R. Marques de São Vicente 225 – Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
nieckele@mec.puc-rio.br

Luis Fernando Gonçalves Pires

Núcleo de Simulação Termohidráulica de Dutos – Dept. de Eng. Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro
R. Marques de São Vicente 225 – Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
lpires@mec.puc-rio.br

Arturo Jesús Ortega

Núcleo de Simulação Termohidráulica de Dutos – Dept. de Eng. Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro
R. Marques de São Vicente 225 – Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
arturo@mec.puc-rio.br

Sergio Luis Mosckem

Especialista de Engenharia Mecânica, Divisão de Engenharia Mecânica – IUN, Arcelor, Brasil - CST
sergio.mosckem@arcelor.com.br

Resumo. Processos de sopro em linhas para alto-fornos são caracterizados por escoamento de ar, com altas vazões e temperaturas, em dutos de grandes diâmetros e comprimento relativamente pequeno. O fechamento indevido de válvulas ao longo da tubulação, bloqueando o escoamento, pode trazer conseqüências indesejadas, como o surgimento da situação de “surge”, colocando em risco os componentes do sistema de alto-forno. O objetivo do presente trabalho consiste em analisar numericamente o escoamento com transferência de calor, num processo de sopro para um alto-forno numa indústria siderúrgica. Os campos de velocidade, pressão e temperatura são obtidos através da solução das equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia, utilizando o método das diferenças finitas. Considera-se a presença dos diversos componentes típicos num sistema de alto-forno, como compressores axiais, sistemas anti-surge, válvulas de bloqueio e regeneradores. São avaliados os efeitos sobre o turbo-soprador e o desempenho dos sistemas de proteção, decorrentes de transientes nas operações provocadas pelo fechamento de válvulas no duto, da manobra de troca de alimentação dos regeneradores e da queda do alto-forno.

Palavras chave: Sopro alto-forno, análise transiente, sistema “anti-surge”, golpe de aríete.

1. Introdução

Na indústria siderúrgica, o alto forno é alimentado com ar, através de turbo-sopradores. Tipicamente as vazões são altas e as tubulações apresentam grande diâmetro, porém possuem comprimento relativamente pequeno. Ao longo da linha, diversas válvulas podem ser encontradas, como válvulas de bloqueio e válvulas de alívio (ABIME, 1987). Uma operação indevida das válvulas pode causar picos de pressão no interior do duto, danificando equipamentos e interrompendo a operação do alto forno, podendo levar a grandes prejuízos.

Vários aspectos envolvendo problemas com fechamento de válvulas vêm sendo estudados por muitos pesquisadores (Sharp, 1974, Azoury et al, 1986, Liou, 1991). Muitos desses assumiram escoamentos sem atrito, porém Sharp (1974) discutiu o efeito do escoamento com atrito na máxima pressão atingida, ressaltando a importância da correta determinação do mesmo. Recentemente, uma série de trabalhos foi desenvolvida visando avaliar correlações não permanente para a avaliação do fator de atrito durante operações transientes (Bouazza, 2004 e Vitkovsky et al, 2004).

Uma pesquisa na literatura mostra alguns trabalhos relacionados com operação de alto forno. A análise de sistema de operação de altos fornos devido à injeção de gás foi realizada por Burgler et al. (2004), enquanto que Valle (1999) investigou o uso de compressores axiais como sopradores para o alto forno. O problema de *surge* no compressor na linha de alimentação de altos fornos foi estudado por Strut e Suter (1965). Recentemente, Ziebig e Stanek (2006) avaliaram a influência nos parâmetros térmicos na perda de calor na operação de altos fornos.

A motivação do presente trabalho consiste em evitar pressões altas no interior da tubulação de maneira de evitar a situação de *surge* no turbo-soprador, durante as operações habituais numa linha para alto-forno. Portanto, o objetivo do presente trabalho consiste em analisar numericamente o escoamento de ar uma linha de sopro para alto-forno, simulando condições de operações que podem ocorrer numa indústria siderúrgica. São analisadas condições de escoamento decorrentes de operações indevidas dos componentes, visando avaliar o sistema de proteção dos turbo-sopradores. A presença de elevados picos de pressão se torna um problema maior em tubulações de pequeno comprimento, pois a distância percorrida pela onda de pressão é menor, não dando tempo para a mesma se dissipar.

O algoritmo computacional foi desenvolvido utilizando o método das diferenças finitas (Anderson et al., 1984, Press, 1992) o qual resolve as equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia, incorporando a capacidade de simulação de escoamento de ar num duto alimentado por um turbo-soprador. Além do modelo para este componente, foram também desenvolvidos modelos para o sistema *anti-surge*, válvulas e demais equipamentos presentes no sistema do alto-forno.

2. Modelo do sistema de sopro simulado

Num sistema de sopro os turbo-sopradores alimentam os dutos que levam o ar ao alto forno. Ao longo das linhas tanto válvulas de bloqueio como válvulas de alívio podem ser encontradas. Um sistema típico de sopro de um alto forno encontra-se representado isometricamente na Fig. (1).

Na linha de sucção do turbo-soprador (*blast blower*) existe um sistema de filtragem para eliminação de particulado. A descarga do turbo-soprador está conectada a um duto de 1,4m de diâmetro onde estão localizadas duas válvulas *anti-surge*. Após a derivação para as válvulas *anti-surge*, estão localizadas duas válvulas, uma de bloqueio e outra de retenção. Uma expansão, localizada cerca de 24m após o turbo-soprador, transforma o diâmetro do duto para 1,6m. Cinquenta e um metros após a expansão está localizada uma válvula de bloqueio de manobra de linhas, que isola a linha de sopro atual de outra linha. Uma nova expansão para 1,7m está localizada após esta válvula. O duto prossegue até os regeneradores, distante cerca de 650m. Neste ponto existe uma outra válvula de bloqueio e logo após a derivação para os quatro regeneradores. Na entrada de cada regenerador está instalada uma válvula de bloqueio para isolar o regenerador específico. Após os regeneradores, o duto segue para o alto-forno.

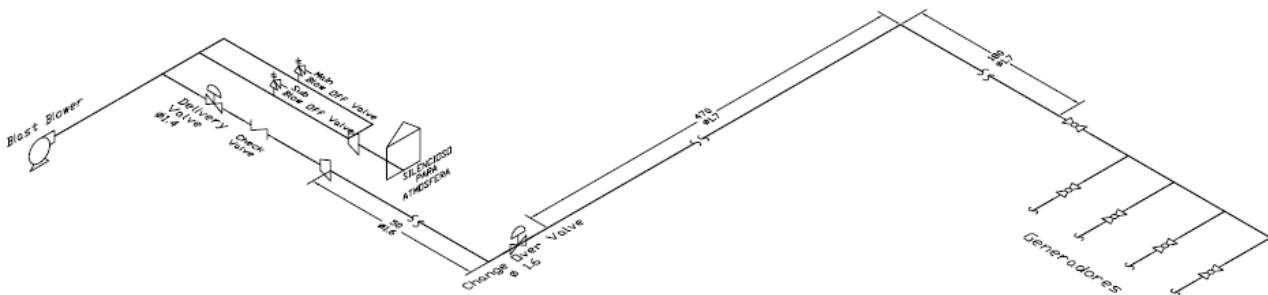


Figura 1. Isométrico da linha de sopro 1.

2.1. Turbo-soprador

As curvas características do turbo-soprador podem ser representadas por um diagrama das curvas características típicas de um compressor axial, sendo a vazão controlada pelo ângulo das palhetas do estator. Num compressor axial observa-se que as linhas, representando um determinado ângulo de palheta, são quase verticais o que caracteriza uma vazão praticamente constante para uma grande faixa de pressão. Pontos de controle de *surge* são definidos através de pontos de ajuste de alarme, proteção (abertura da válvula *sub blow off*) e crítico (abertura da válvula *main blow off*).

2.2. Válvulas *anti-surge*

As válvulas *anti-surge*, também chamadas de *main blow off* e *sub blow off*, estão localizadas a cerca de 20m da descarga do turbo-soprador. A válvula *sub blow off* tem um diâmetro de 730mm e a válvula *main blow off* tem um diâmetro de 1,050m.

A válvula *sub blow off* e a válvula *main blow off* podem ter sua atuação comandada manualmente ou através de uma malha de controle, ajustada para valores de pressão obtidos na descarga do turbo-soprador. O tempo de abertura total destas válvulas é ajustado e pode variar de 6 a 30s.

Utilizando a modelagem matemática de válvulas indicada nas normas ISA S75.01-S75.02 para fluidos compressíveis, pode-se determinar a vazão através das válvulas de acordo com:

$$Q = N F_p C_v P_u Y \left[\left(\frac{x}{SG T_u Z_u} \right) \right]^{0,5} \quad (1)$$

onde Q é a vazão volumétrica nas condições padrões (m^3/s); N é uma onstante numérica ($8,8 \times 10^{-10}$); F_p é o fator que considera as mudanças geométricas dos dutos conectados na válvula (1); C_v é o coeficiente da válvula [$(m^3/s)/Pa^{0,5}$]; P_u é a pressão absoluta a montante da válvula (kPa); T_u é a temperatura absoluta a montante da válvula (K); Z_u é o fator de

compressibilidade a montante da válvula, SG é a gravidade específica do gás; x é a taxa relativa de queda de pressão, e Y é o fator de expansão.

A taxa relativa de queda de pressão e o fator de expansão são fornecidos pelas Eqs. (2) e (3).

$$x = \frac{P_u - P_d}{P_u} \quad ; \quad Y = 1 - \frac{x}{3 F_K x_T} \quad (2)$$

onde x_T é o máximo valor de x , dependente da característica física da válvula selecionada, F_k é a relação de expoentes isentrópicos do gás com respeito ao ar $F_k=k/1,4$; onde $k=cp/cv$ é a razão entre o calor específico a pressão constante cp e a volume constante cv .

As relações anteriores são usadas quando x não excede a $F_k x_T$, caso contrário o valor de $F_k x_T$ é usado no lugar de x e Y fica igual a 0,667. Os valores de C_v utilizados para as válvulas *main* e *sub blow off* são de $8,86 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)/Pa}^{0,5}$ e de $2,01 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)/Pa}^{0,5}$ respectivamente.

2.3. Válvulas de bloqueio intermediárias

Ao longo do duto existem três válvulas com capacidade para bloquear totalmente a linha. A válvula próxima à descarga do turbo-soprador (*delivery valve*) é uma válvula tipo gaveta, com tempo de fechamento em torno de 120 e 50 s. Visando permitir a manobra das linhas de sopro para substituição dos turbo-sopradores, encontra-se uma válvula do tipo guilhotina (*change over valve*), de passagem plena, com o mesmo tempo de atuação. A terceira válvula encontra-se próxima aos regeneradores, sendo do tipo gaveta. Na entrada de cada um dos quatro regeneradores existe uma válvula, com um tempo de atuação entre 15 a 20 s. Elas possuem inter-travamento duplo/redundante de forma a evitar o fechamento simultâneo das quatro válvulas. Os diâmetros destas válvulas e os C_v utilizados estão apresentados na Tab. (1).

Tabela 1 – Características das válvulas de bloqueio intermediárias

Válvula	D_N (m)	C_V (m ³ /s)/Pa ^{0,5}
Válvula próxima à descarga do turbo-soprador (<i>delivery valve</i>)	1,5	0,106
Válvula de manobra de linhas (<i>change over valve</i>)	1,6	0,106
Válvula próxima dos regeneradores	1,7	0,106
Válvula de manobra dos regeneradores	1,5	0,106

3. Resultados

Tendo em vista que o objetivo do trabalho é avaliar situações de operação normal ou acidental que possam comprometer a operação do turbo-soprador, foi imposta uma vazão típica de operação na entrada da linha, correspondente a $Q = 103,3 \text{ Nm}^3/\text{s} = 372000 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ e os seguintes eventos foram selecionados para serem investigados:

- i) Fechamento indevido de válvulas de bloqueio no duto.
- ii) Manobra de troca de regeneradores.
- iii) Troca dos sopradores em operação.

Uma vez ajustados os parâmetros dos diversos equipamentos da linha de alimentação do alto forno com dados de campos, diferentes cenários de operação que poderiam comprometer os sopradores foram investigados. Inicialmente considerou-se o fechamento das válvulas de bloqueio, tanto de manobra de linhas quanto de chegada aos regenerados. Nestes casos, investigou-se o comportamento do escoamento sem e com a utilização das válvulas *anti-surge*. A influência no escoamento do tempo de abertura das válvulas *anti-surge* também foi investigada.

A seguir, analisou-se a influência no escoamento da operação indevida de válvulas na de troca de regeneradores e finalmente a influência da troca dos sopradores em operação levando a atuação simultânea dos dois sopradores.

3.1. Fechamento das válvulas de bloqueio intermediária sem sistema *anti-surge*

O primeiro teste realizado consistiu em investigar o efeito no campo de velocidade e pressão do fechamento da válvula de bloqueio de manobra de linhas (*change over valve*), sem utilizar o sistema *anti-surge*.

O transiente foi obtido ao fechar a válvula de bloqueio de manobra de linhas usando um tempo de fechamento de 120s. As variações da pressão e da vazão com o tempo na válvula de bloqueio encontram-se ilustradas na Fig. (2). O fechamento se inicia no instante 360s e no momento do fechamento total da válvula de bloqueio (480s) a pressão atinge o valor de 931,6 kPag (9,50 kgf/cm²g), já tendo ultrapassado a pressão crítica de 686,5 kPag (7 kgf/cm²g), 2s antes do fechamento total. Com o duto bloqueado, a pressão se eleva praticamente de forma linear, atingindo valores elevados muito rapidamente.

Vale ressaltar que como a queda de pressão ao longo do duto é muito pequena, o comportamento da pressão na válvula de bloqueio é análogo ao comportamento da pressão no compressor. Este resultado ilustra que o comportamento da válvula de bloqueio de manobra de linhas apresenta uma influência grande no escoamento.

A segunda análise realizada consistiu em verificar a influência da válvula de bloqueio próxima os regeneradores, também sem utilizar o sistema *anti-surge*. O transiente foi gerado pelo fechamento desta válvula, utilizando um tempo de 120s.

A variação com o tempo da pressão e vazão, nesta válvula, é apresentada na Fig. (3). Pode-se observar que o fechamento da válvula se inicia no instante igual a 360s. No momento do fechamento total da válvula de bloqueio (480s) a pressão atinge o valor de 476,6 kPag (4,86 kgf/cm²g). Com o duto bloqueado, a pressão se eleva praticamente de forma linear, atingindo o valor de 686,5 kPag (7 kgf/cm²g) (valor de *surge*) no instante 497s, isto é, 17s após o fechamento total da válvula de bloqueio. Pode-se observar que o aumento da pressão nesta válvula, próxima aos regeneradores, foi muito mais lento do que o aumento na válvula de bloqueio de manobra de linha. Novamente, devido à pequena queda de pressão na linha, o comportamento da pressão nos sopradores é análogo.

A partir destas duas análises realizadas, verifica-se que quanto mais próximo do soprador for o bloqueio do duto, mais severo e rápido é o transiente.

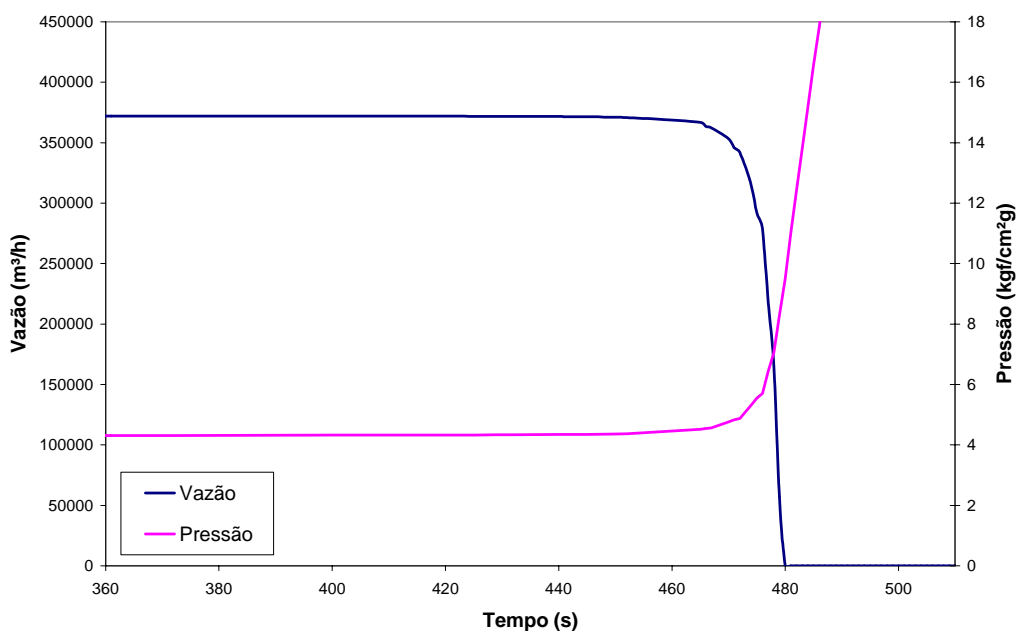


Figura 2. Variação da pressão e vazão na válvula de bloqueio de manobra de linhas.

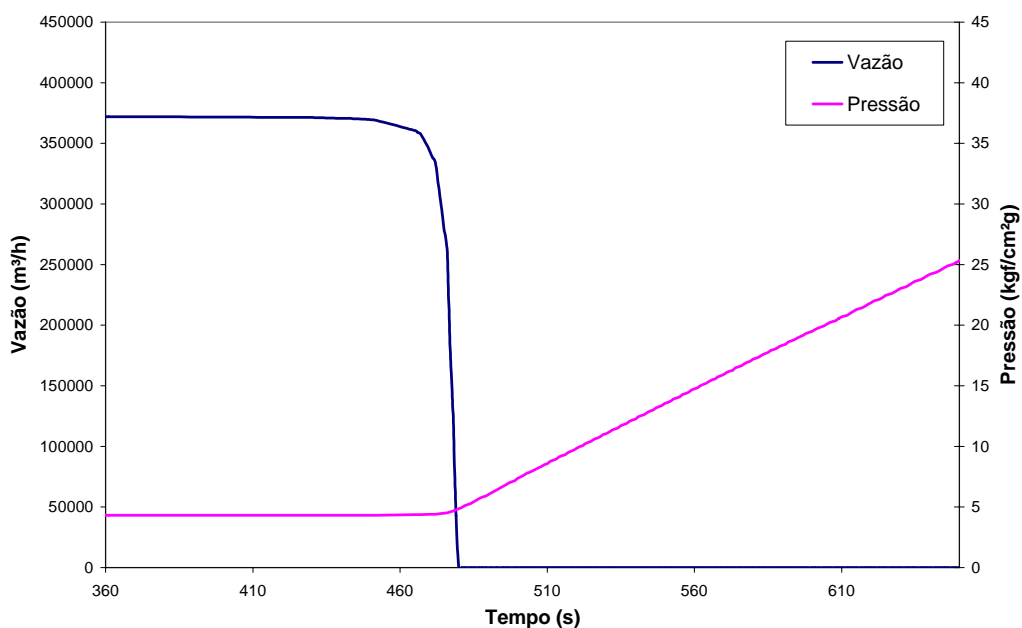


Figura 3. Variação da pressão e vazão na válvula de bloqueio da linha de chegada aos regeneradores.

3.2. Fechamento das válvulas de bloqueio intermediárias com sistema anti-surge

Dando continuidade às análises, como no caso anterior, a válvula de bloqueio da linha de chegada aos regeneradores foi fechada no instante de 360s, utilizando um tempo de fechamento de 120s. Neste caso, os parâmetros operacionais utilizados para as válvulas *anti-surge* encontram-se na Tab. (2).

Tabela 2 – Parâmetros operacionais utilizados para as válvulas *anti-surge*

	Tempo de abertura (s)	Setpoint (kPag)
<i>sub blow off</i>	6	520
<i>main blow off</i>	6	559

As variações da pressão e da vazão com o tempo encontram-se ilustradas nas Figs. (4) e (5), para a válvula de bloqueio da linha de chegada aos regeneradores e as válvulas *anti-surge*, respectivamente. Observa-se na Fig. (4), o aumento da pressão na válvula de bloqueio, no instante de fechamento total da válvula. Praticamente no mesmo instante, a válvula *anti-surge sub-blow off* é aberta, pode-se observar o aumento da vazão na mesma na Fig. (5). Porém, como a pressão continua a subir, poucos segundos após a válvula *anti-surge main-blow off* também é aberta. Obteve-se a máxima pressão, na posição das válvulas *anti-surge*, igual a 571,7 kPag (5,83 kgf/cm²g). Devido à abertura das duas válvulas *anti-surge*, a pressão começa a cair, e conseqüentemente também a vazão em cada uma das válvulas *anti-surge*. Note que, como já mencionado, devido à baixa perda de carga na linha o comportamento da pressão nas duas válvulas (de bloqueio e *anti-surge*) é análogo.

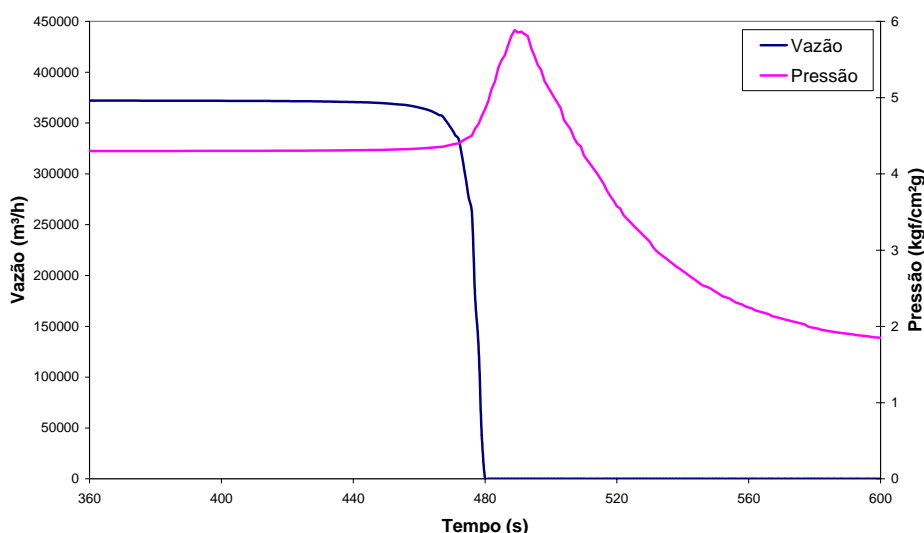


Figura 4. Variação da pressão e vazão na válvula de bloqueio da linha de chegada aos regeneradores.

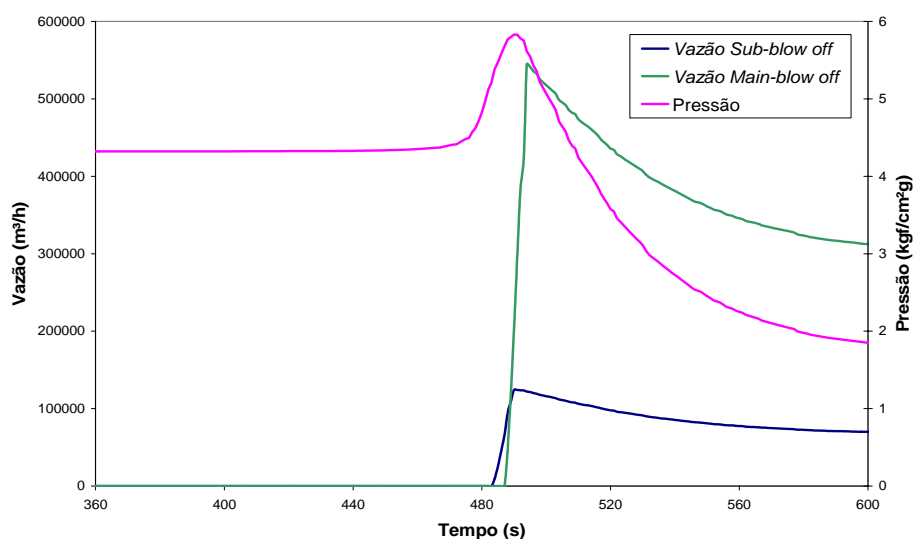


Figura 5. Variação da pressão e vazão nas válvulas *anti-surge*.

Num segundo teste, o comportamento da pressão na válvula de bloqueio de manobra de linhas, utilizando o sistema *anti-surge* é analisado. Novamente, manteve os mesmos parâmetros de operação da válvula de bloqueio (fechamento no instante de 360s, com duração de 120s). Neste caso, os parâmetros operacionais utilizados para as válvulas *anti-surge* são os mesmos do caso anterior os quais se encontram na Tab. (2).

As variações da pressão e da vazão com o tempo na válvula de bloqueio de manobra de linhas encontram-se ilustradas na Fig. (6), enquanto que a Fig. (7) apresenta a pressão e vazão nas válvulas *anti-surge*. Pode-se observar que o comportamento do escoamento é qualitativamente semelhante ao descrito no item anterior. Porém, como a resposta da pressão para a válvula de bloqueio de manobra de linhas é mais rápida, observa-se um aumento acentuado da pressão e uma pequena perturbação no instante de abertura das válvulas *anti-surge*. Nota-se que a abertura consecutiva das duas válvulas *anti-surge* consegue controlar o aumento da pressão, a qual atinge o valor máximo de 574,7 kPag (5,86 kgf/cm²g).

A presente análise mostra que o correto funcionamento do sistema *anti-surge* é fundamental para evitar pressões que possam danificar o soprador.

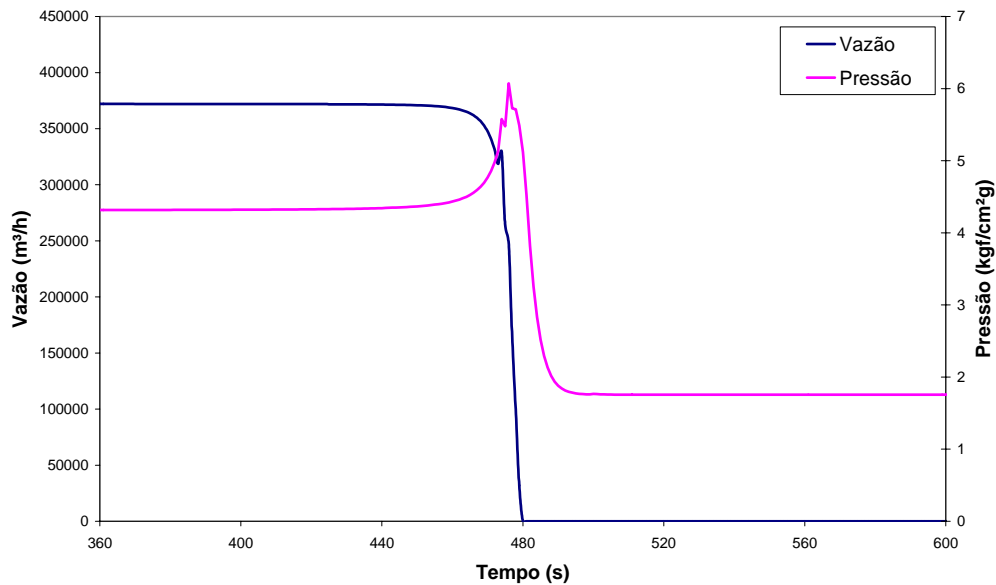


Figura 6. Variação da pressão e vazão na válvula de bloqueio de manobra de linhas.

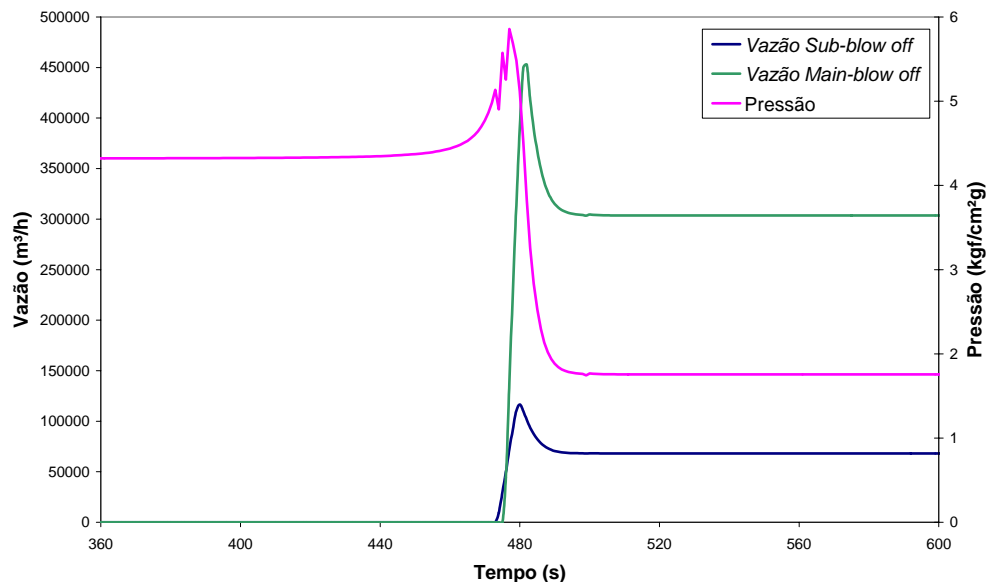


Figura 7. Variação da pressão e vazão nas válvulas *anti-surge*.

3.3. Avaliação do tempo de abertura das válvulas *anti-surge* para o bloqueio do duto

Para avaliar a influência do tempo de abertura das válvulas *anti-surge* na atuação das mesmas na válvula de bloqueio de manobra de linhas e na válvula próxima aos regeneradores, repetiu-se os testes anteriores, utilizando-se

dois tempos diferentes para abertura das válvulas *anti-surge*.

Como nos testes anteriores, duas simulações foram realizadas. Na primeira a válvula de manobra de linhas foi fechada no instante igual a 360s e utilizou-se um tempo de fechamento da mesma igual a 120s, manteve-se a válvula de bloqueio próxima aos regeneradores completamente aberta. Na segunda simulação, inverteu-se a situação, i.e., fechou-se a válvula próxima aos regeneradores mantendo a válvula de manobra de linhas aberta. Nas válvulas *anti-surge* os mesmos *setpoint* de pressão que os utilizados nos testes anteriores foram especificados, Tab.(2). Para investigar a influência do tempo de abertura, consideraram-se tempos de abertura de 6s e de 30s.

A distribuição de pressão nas válvulas *blow off* durante o fechamento da válvula de manobra de linhas é ilustrada na Fig. (8) para os dois tempos de abertura da válvula *anti-surge*. Enquanto que a Fig. (9) apresenta os resultados devido ao fechamento da válvula próxima aos regeneradores.

Observa-se que para o bloqueio do duto provocado pelo fechamento da válvula de bloqueio próxima aos regeneradores, mesmo para um tempo de abertura das válvulas de *blow off* igual a 30s, a pressão máxima não ultrapassa o valor crítico de 686,5 kPag. Isto já não se verifica para o caso da válvula de bloqueio de manobra de linhas. Neste caso a abertura das válvulas de *blow off* num tempo de 30s provoca uma elevação de pressão superior à pressão crítica, chegando a 1118 kPag (11,4 kgf/cm²g). Este valor de pressão poderia levar o compressor para uma situação de *surge*.

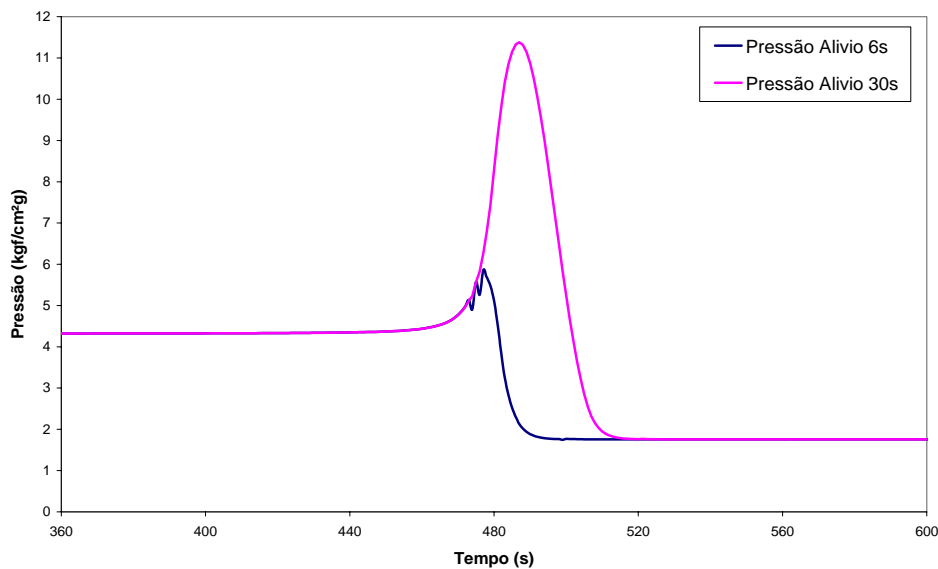


Figura 8. Comparação entre as variações de pressão para atuação das válvulas *anti-surge* com 6s e 30s, fechamento da válvula de bloqueio de manobra de linhas.

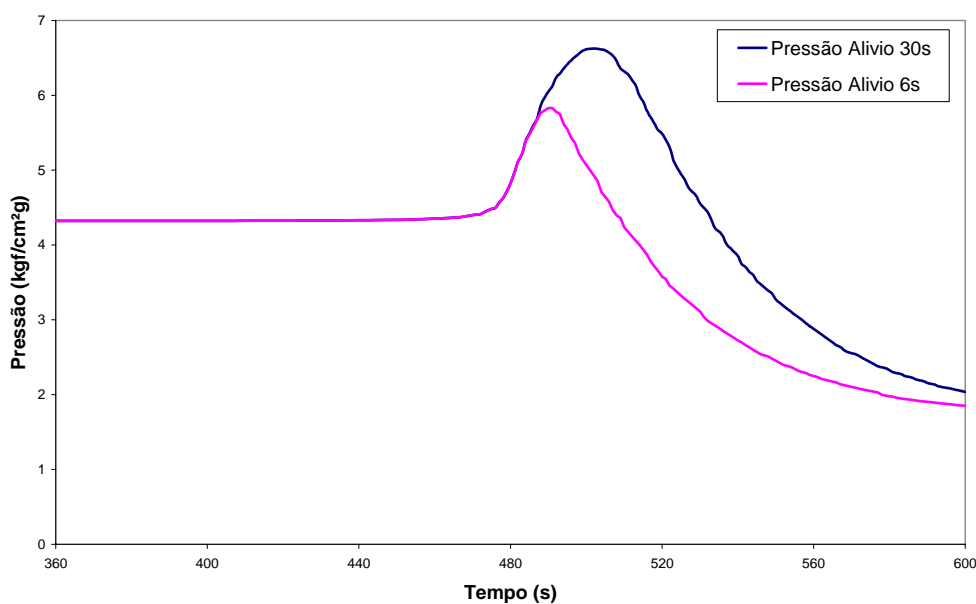


Figura 9. Comparação entre as variações de pressão para atuação das válvulas *anti-surge* com 6s e 30s, fechamento da válvula de bloqueio próxima aos regeneradores.

3.4. Operação indevida das válvulas durante a troca dos regeneradores

O processo de troca dos regeneradores é caracterizado pela elevação momentânea da vazão de sopro enquanto a válvula de um regenerador é fechada, e a válvula do regenerador que estava aquecendo é aberta. Desta forma, uma operação equivocada destas válvulas poderia levar ao fechamento do regenerador que sairia de linha, sem a abertura do outro. Este fato produziria uma restrição para o escoamento, mas não o completo bloqueio do duto. Este evento foi simulado considerando que a elevação da vazão de 103,3 Nm³/s (372000 Nm³/h) para 120 Nm³/s (432000 Nm³/h) ocorre em 60s, e logo após a válvula de um regenerador é fechada em 20s, fazendo com que o escoamento ocorra somente por dois regeneradores.

A Figura (10) apresenta a variação da pressão na descarga do turbo-soprador, durante a troca dos regeneradores como descrito acima. Observa-se que a queda de pressão no regenerador para a vazão mais elevada, quando somente dois regeneradores encontram-se abertos, é de 25,5 kPag (0.26 kgf/cm²g), cerca do triplo da existente em condição normal. Porém, a pressão no soprador atinge um valor máximo de 530,5 kPag (5,41 kgf/cm²g), não comprometendo o equipamento, mesmo sem a atuação do sistema *anti-surge*.

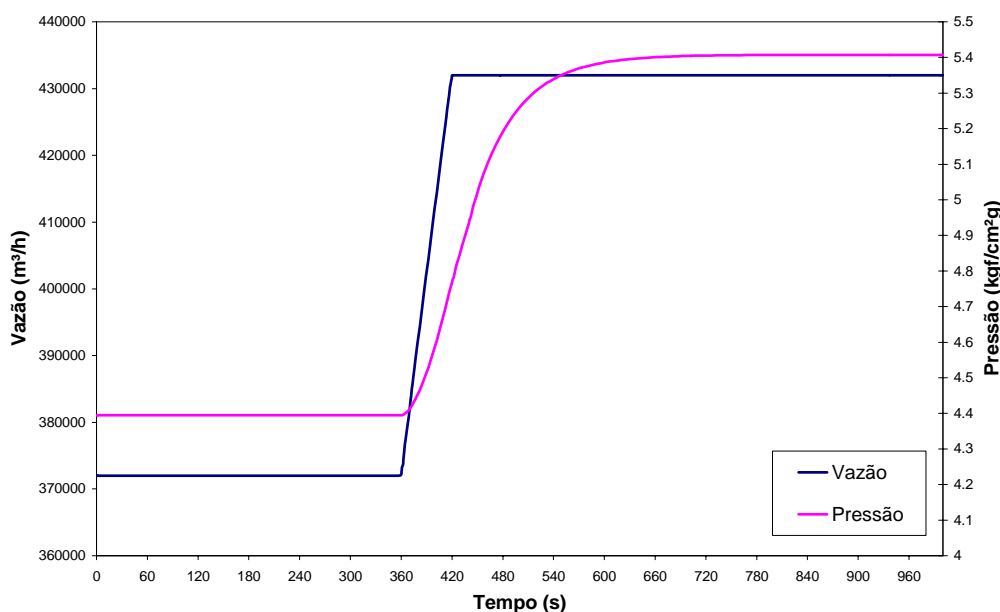


Figura 10. Variação da pressão e vazão na descarga do turbo-soprador durante a troca indevida dos regeneradores.

3.5. Atuação simultânea dos dois sopradores

A troca dos sopradores sem interrupção do processo pode caracterizar uma situação na qual a manobra indevida das válvulas pode colocar os sopradores em situação de *surge*. O caso analisado parte da situação da linha de sopro sendo alimentada por um soprador 1 e com outro soprador 2 descarregando para a atmosfera através de suas válvulas de *blow off*. Nesta condição, o retorno do sopro da linha pelas válvulas de *blow off* do soprador 2 é impedido pela válvula de retenção na descarga do soprador 2.

O transiente é gerado pelo comando manual de fechamento das válvulas de *blow off* do soprador 2 provocando uma rápida elevação de pressão no pequeno trecho de duto entre o soprador 2 e sua válvula de retenção. Quando a pressão atinge o valor existente do outro lado desta válvula, esta se abre permitindo o escoamento do ar para a linha principal. Dois cenários foram investigados. No primeiro não se considerou a atuação das válvulas *anti-surge* do soprador 1, as quais foram acionadas no segundo cenário.

A Figura (11) ilustra a variação da vazão e pressão na válvula de *blow off* do soprador 2, juntamente com a vazão nos regeneradores, correspondente a operação descrita acima, sem acionar as válvulas *anti-surge* de proteção dos equipamentos.

Pode-se observar que a medida que a válvula de *blow off* são fechadas, a pressão começa a subir. Após o fechamento completo da válvula de *blow off*, devido ao aumento da pressão na válvula de retenção, esta é aberta e a vazão em ambos sopradores passa a ser adicionada à linha, levando a um aumento da vazão nos regeneradores. Devido as grandes dimensões do duto, a elevação de pressão torna-se mais suave e a vazão na entrada dos regeneradores acompanha esta elevação, até atingir um valor constante igual ao valor da soma da descarga dos dois sopradores. Observa-se que devido à ausência da atuação das válvulas *anti-surge* o valor crítico de pressão é ultrapassado.

A seguir, o mesmo teste foi realizado, porém com a atuação das válvulas *anti-surge* do soprador 1. A variação temporal da pressão e vazão nas válvulas de *blow off* dos dois sopradores encontra-se ilustrada na Fig. (12).

Observa-se que a partir de 15s (início do fechamento das válvulas de *blow off* do soprador 2) a pressão se eleva gradativamente, como descrito no teste anterior. Quando a pressão atinge 520 kPag (5,3 kgf/cm²g) a válvula *sub blow off* do soprador 1 abre. A pressão continua se elevando, porém com uma taxa de crescimento bem menor. Quando a pressão atinge a 559 kPag (5,7 kgf/cm²g), a válvula *main blow off* do soprador 1 abre. Após este instante, a pressão do soprador 1 cai bruscamente e a pressão do soprador 2 começa gradativamente a descer, não atingindo valores que provoquem problemas para os sopradores.

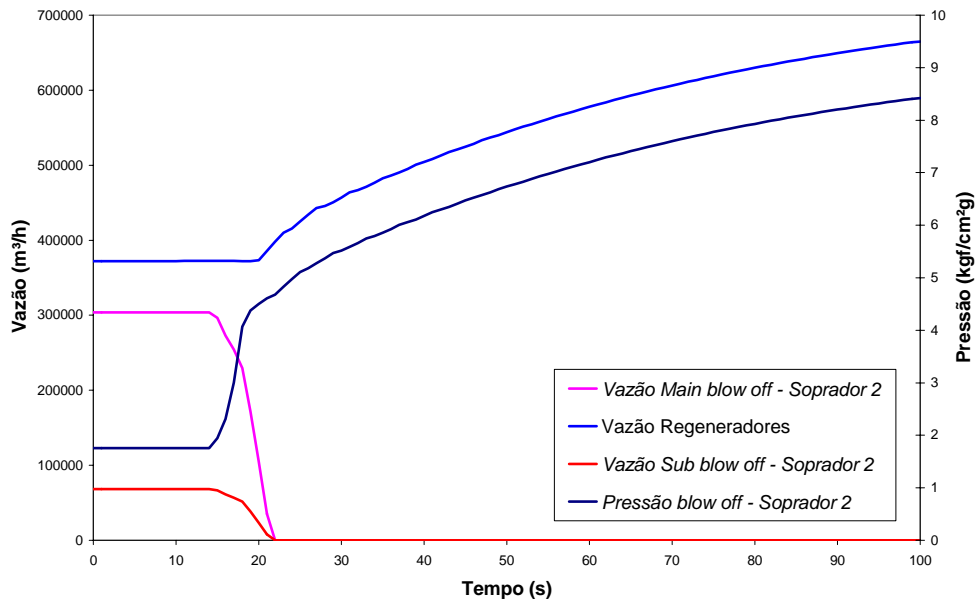


Figura 11. Variação da pressão e vazão nas válvulas *anti-surge* do soprador 2 e da vazão na entrada dos regeneradores.

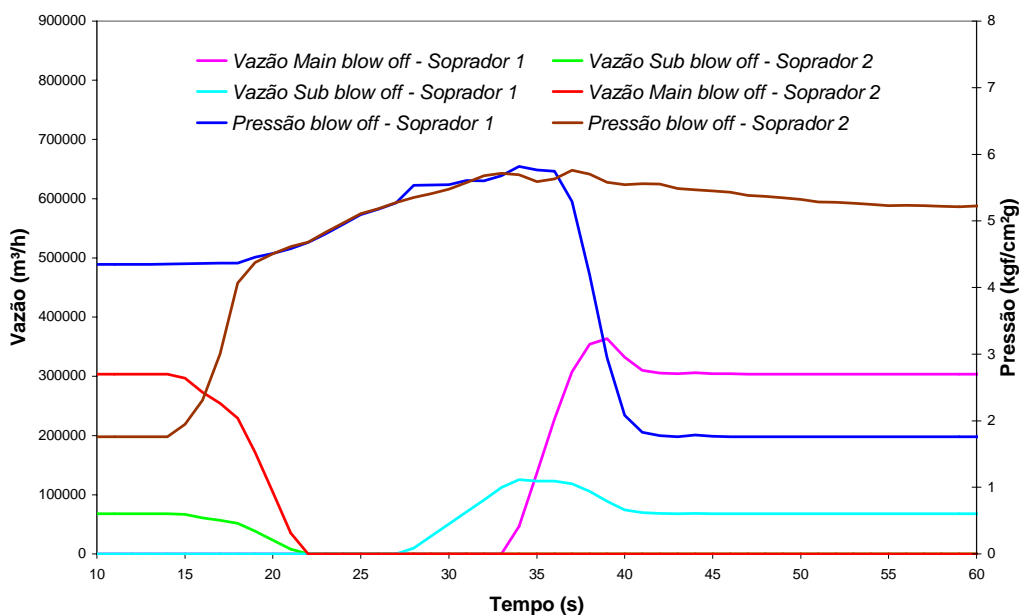


Figura 12. Variação da pressão e vazão nas válvulas *anti-surge* dos sopradores 1 e 2.

4. Conclusões

O fechamento indevido da válvula de bloqueio de manobra de linhas gera um transiente muito mais severo que o ocasionado pelo fechamento da válvula de bloqueio próximo aos regeneradores.

A operação de troca dos regeneradores, mesmo com a operação indevida das válvulas de forma a manter somente dois regeneradores abertos, não leva ao soprador para uma condição de risco.

A operação imprópria da troca dos sopradores sem interromper o processo provoca elevações de pressão que podem ser controladas com a atuação das válvulas *anti-surge* de um dos sopradores. Recomenda-se que as válvulas do sistema *anti-surge* tenham um tempo de abertura o menor possível, visando a segurança dos sopradores.

Nas análises apresentadas, considerou-se que as válvulas do sistema *anti-surge* iniciavam a abertura no mesmo instante no qual a pressão atingia os valores de *setpoint*. Eventuais retardos provocados pela mecânica de atuação das válvulas e pelo tempo morto da instrumentação não foram considerados. Recomenda-se que o sistema tenha manutenções e ajustes periódicos de forma a manter estes tempos o mais baixo possível.

O tempo de abertura das válvulas *anti-surge* influencia nos resultados de máxima pressão para os transientes avaliados. No caso do bloqueio do duto pela válvula de manobra de linha, o tempo de abertura de 30s leva ao soprador para uma condição que ultrapassa a linha de *surge*. De todos os transientes avaliados esta configuração se mostrou como a única na qual o soprador seria colocado nesta situação.

5. Agradecimentos

Os autores desejam agradecer à Companhia Siderúrgica de Tubarão CST-Arcelor Brasil pela colaboração para a execução deste trabalho.

6. Referências

- Anderson, D. A., Tannehil, J.C., Pletcher, R.H., 1984, "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", McGrawHill.
- ABIME, Associação Brasileira Da Indústria De Máquinas E Equipamentos, 1987, Válvulas Industriais Brasileiras.
- Bouazza, Z., 2004, "A new friction model for transient pipe flows", 9th International Conference on Pressure Surges, Vol. II, pp. 391-404
- ISA S75.01, 1989, "Flow Equations for Sizing Control Valves, standards and recommended practices for instrumentation and control", 10th ed., Vol. 2.
- ISA S75.02, 1989, "Control Valve Capacity Test Procedure, standards and recommended practices for instrumentation and control", 10th ed., Vol. 2.
- Hutchison, J. W., 1976, "ISA Handbook of Control Valves", Instrument Society of America, 2da.
- Liou, C. P., 1991, Maximum Pressure Head Due to Linear Valve Closure, Journal of Fluids Engineering, vol. 113/643.
- Press, W.H. et al., 1992. Numerical recipes in Fortran. The art of scientific computing. Cambridge University Press. Second edition.
- Sharp, B. B., 1974, Discussion of Water Hammer Charts for Various Types of Valves, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 100, 323-326.
- Streeter, V. L., Wylie, B. E., 1967, "Hydraulic Transients", McGraw-Hill Book Company.
- Sturb, R. A., Suter, P., 1965, "Compressor Surge In Gas Turbines And Blast Furnace Compressor Installations", Journal Of Engineering For Power 87 (2): pp. 193.
- Valle A, 1999, "Axial compressors as blast furnace blowers" Stahl Und Eisen 119 (6-7): pp. 149.
- Vitkovsky, J., Stephens, M., Lambert, M, Simpson, A., 2004, "Efficiente and accurate calculation of Ziele and Vardy Brown unsteady friction in pipe transients", 9th International Conference on Pressure Surges, Vol. II, pp. 404-420.
- Ziebig A, Stanek W , 2006, "Influence of blast-furnace process thermal parameters on energy and exergy characteristics and exergy losses ", International Journal Of Energy RESEARCH 30 (4): 203-219 Mar 25 2006.

7. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS OF TRANSIENT IN LINES FOR BLAST-FURNACE

Angela Ourivio Nieckele

Departamento de Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro
R. Marques de São Vicente 225 – Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
nieckele@mec.puc-rio.br

Luis Fernando Gonçalves Pires

Núcleo de Simulação Termohidráulica de Dutos – Dept. de Eng. Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro
R. Marques de São Vicente 225 – Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
lpires@mec.puc-rio.br

Arturo Jesús Ortega

Núcleo de Simulação Termohidráulica de Dutos – Dept. de Eng. Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro
R. Marques de São Vicente 225 – Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
arturo@mec.puc-rio.br

Sergio Luis Mosckem

Especialista de Engenharia Mecânica, Divisão de Engenharia Mecânica – IUN, Arcelor, Brasil - CST
sergio.mosckem@arcelor.com.br

Abstract. Blow processes for blast-furnaces lines are characterized by air flowing at high rates and temperatures, in ducts of large diameter and relatively small length. The improper closing of valves along of the line, blocking the flow, can lead to undesired phenomena, such as the appearance of a surge situation, which can damage the components of the blast-furnace system. The objective of the present work consists of analyzing numerically the flow and temperature field of a blow process for a blast-furnace in an iron and steel industry. The velocity, pressure and temperature fields are obtained through the solution of the conservation equations of mass, linear momentum and energy, using the finite difference method. The presence of several typical components in a blast-furnace system, such as axial compressors, anti-surge systems, block valves and regenerators, are considered. The effect on the turbo-blower and the performance of the protection systems are evaluated due to the transient operations provoked by the closing of valves in the pipeline, the coupling of different regenerators to the flow line and the interruption of the blast-furnace operation.

Keywords: Blow blast-furnace, transient analysis, anti-surge systems, water hammer.