

Avaliação de criticidade e definição de intervalos de inspeção de dispositivos de alívio de pressão utilizando o AHP ratings

/

Criticality evaluation and definition of pressure relief device inspection intervals using AHP ratings

DOI:10.34117/bjdv5n12-305

Recebimento dos originais: 15/11/2019

Aceitação para publicação: 20/12/2019

Wellington Esterque de Andrade

Mestrando em Engenharia de Produção e Sistemas computacionais, pela UFF
Instituição: Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Fluminense
Endereço: Rua Recife, s/n –Jardim Bela Vista, Rio das Ostras, RJ, CEP: 28890-000
E-mail: weco19@gmail.com

Marcilene de Fátima Dianin Vianna

Doutora em Ciências Naturais, pela UENF
Instituição: Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Fluminense
Endereço: Rua Recife, s/n –Jardim Bela Vista, Rio das Ostras, RJ, CEP: 28890-000
E-mail: marcilene_dianin@id.uff.br

Edwin Benito Mitacc Meza

Doutor em Ciência da Computação, pela UFF
Instituição: Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Fluminense
Endereço: Rua Recife, s/n –Jardim Bela Vista, Rio das Ostras, RJ, CEP: 28890-000
E-mail: emitacc@id.uff.br

Dalessandro Soares Vianna

Doutor em Informática, pela PUC-Rio
Instituição: Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Fluminense
Endereço: Rua Recife, s/n –Jardim Bela Vista, Rio das Ostras, RJ, CEP: 28890-000
E-mail: dalessandrovianna@id.uff.br

RESUMO

Uma válvula de alívio de pressão e segurança protege os equipamentos de processo e tubulações quanto à sobre pressões, garantindo que estes não operem em pressões superiores às estabelecidas em projeto, visando a segurança operacional. Este trabalho apresenta a aplicação da metodologia AHP na identificação dos fatores operacionais e de projeto que mais impactam no funcionamento das válvulas de alívio de pressão e segurança, juntamente com a abordagem AHP *ratings* que possibilitou a análise de um número de válvulas maior do que seria possível utilizando o AHP tradicional. Este método proposto gera um índice para cada válvula analisada baseada na sua importância operacional e serve de embasamento para o plano de manutenção preventiva da unidade. Através deste índice, as válvulas foram classificadas em 03 grupos, cujos intervalos de inspeção foram fixados devido a sua

criticidade. Estes intervalos atribuídos teriam um potencial de redução de custos, devido ao aumento da média de prazos de inspeção, porém com redução em alguns casos para válvulas mais importantes, aumentando a confiabilidade e segurança da planta de processo.

Palavras chave: AHP ratings, válvula de alívio de pressão e segurança, plano de manutenção.

ABSTRACT

A pressure relief valve protects process equipment and piping from overpressures, ensuring that they do not operate at pressures higher than those established in design, for operational safety. This work presents the application of the AHP methodology in the identification of the operational and design factors that most impact the operation of the pressure and safety relief valves, together with the AHP ratings approach that allowed the analysis of a larger number of valves than would be possible using traditional AHP. This proposed method generates an index for each analyzed valve based on its operational importance and serves as a basis for the preventive maintenance plan of the unit. Through this index, the valves were classified into 03 groups, whose inspection intervals were fixed due to their criticality. These assigned intervals would have the potential to reduce costs due to increased average inspection times, but with reduction in some cases for important valves, increasing process plant reliability and safety.

Keywords: AHP Ratings; Pressure relief devices; Maintenance plan.

1. INTRODUÇÃO

O setor de inspeção de equipamentos estáticos é responsável pela integridade dos vasos de pressão, caldeiras, tubulações e demais equipamentos que fazem parte do ativo de processamento de gás natural. Dentre os equipamentos controlados, existem os dispositivos de alívio de pressão (Pressure Relief Device - PRD), que são considerados como a última barreira de proteção do processo contra sobre pressões, atuando quando ocorre alguma falha no controle destes processos.

O American Petroleum Institute (API) define na norma API 576 (2017, p. 5) que os PRD protegem as pessoas e as instalações, abrindo em pressões predeterminadas e prevenindo as consequências de pressões excessivas em sistemas de processos e vasos de armazenagem. Ainda segundo o API, os principais exemplos destes dispositivos são as válvulas de alívio de pressão com mola direta, válvulas de alívio de pressão operadas por piloto, discos de ruptura, dispositivos de pino de flambagem e dispositivos carregados de peso.

A Norma Regulamentadora do Trabalho NR-13, do Ministério do Trabalho e Emprego e que aborda os requisitos de caldeiras, vasos de pressão e tubulações industriais, determina que

todo equipamento enquadrado na mesma deve possuir um PRD para proteger contra sobrepressões.

Dentre estes tipos de dispositivos de alívio de pressão, as mais comuns são as válvulas de alívio de pressão (Pressure Safety Valves - PSV), que atuam quando a pressão do sistema onde estão instaladas atinge a pressão de ajuste (set pressure) da válvula, vencendo assim a força exercida pela mola e separando o disco do bocal de vedação, onde, após a despressurização parcial, a válvula se fecha, interrompendo o fluxo (IBP, 2002, p. 5).

A norma API 510 (2014, p.39) determina que os dispositivos de alívio de pressão devem ser inspecionados e calibrados em intervalos frequentes o suficiente para garantir o funcionamento de maneira confiável nas suas condições operacionais. Também determina que o intervalo máximo sugerido de inspeção e calibração destes dispositivos é de 5 anos para serviços em processos típicos e 10 anos para serviços em processos limpos e não corrosivos.

Segundo a PETROBRAS (2016, p. 6), as válvulas de alívio de pressão e segurança devem possuir um plano de inspeção e calibração preventiva considerando os seguintes fatores: histórico da válvula, condições operacionais, condições de projeto, mecanismos de danos dos componentes e a consequência da falha do equipamento protegido. A definição dos intervalos de inspeção e calibração deste plano é norteadada por normas e procedimentos internos e pelas normas API, entretanto o intervalo máximo é definido pela norma NR-13, baseado na criticidade do equipamento protegido pela válvula.

Apesar de limitados os intervalos máximos de inspeção, a norma API 576 (2017, p. 59) salienta que os registros históricos que refletem os resultados das inspeções e calibrações periódicas dos dispositivos de alívio de pressão e a experiência operacional são guias valiosos para estabelecer a frequência de inspeção segura e econômica. Portanto o processo de definição dos intervalos de inspeção é composto por uma completa análise dos dados de projeto do equipamento protegido, das condições operacionais e suas variáveis e das características técnicas da válvula.

Cabe ressaltar que as válvulas de segurança são inspecionadas e calibradas de acordo com o atual plano de manutenção preventiva definido pelo Profissional Habilitado, baseado na sua experiência e no histórico dos equipamentos. Entretanto a Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), onde será realizado o estudo, apresenta os intervalos de inspeção e calibração consideravelmente menores que os prazos máximos definidos pela NR-13, o que acarreta em um custo adicional em manutenção e compromete a disponibilidade de alguns equipamentos, devido às paradas programadas para manutenção.

Assim, neste contexto, surge o desafio de definir quais válvulas de segurança e alívio de pressão devem ser priorizadas nas manutenções preventivas e quais são consideradas menos críticas para o processo ou que estão menos sujeitas às falhas operacionais.

2. SUSTENTAÇÃO TEÓRICA

As válvulas de alívio e segurança estão expostas à diferentes condições operacionais, umas com pressão de operação muito próxima à sua pressão de ajuste, outras com fluidos mais agressivos aos seus internos, algumas expostas à vibração, entre outros (API 576, 2017). Um desafio encontrado é saber quais destas condições, ou a possibilidade de uma combinação destas, são mais impactantes na operacionalidade dos dispositivos e quais são menos relevantes. Este desafio também se aplica para enumerar quais válvulas que, se falharem em serviço, irão comprometer mais a produção, gerar uma maior perda econômica, aumentar o risco de acidentes ou são mais complexas para serem disponibilizadas para manutenção.

Selecionar e classificar os principais fatores que influenciam no funcionamento dos dispositivos de segurança e sua segurança operacional são tarefas complexas e que dependem muito do conhecimento técnico do profissional e sua experiência. Uma das técnicas que pode ser aplicada para a seleção e classificação destes fatores é o Analytic Hierarchy Process (AHP), criado por Thomas L. Saaty, que foi desenvolvido para suprir a demanda de um método de fácil compreensão e implementação para permitir a tomada de decisões complexas (BUSHMAN e RAI, 2014, p. 15) e permite propor uma estimativa de valor para estes fatores de influência.

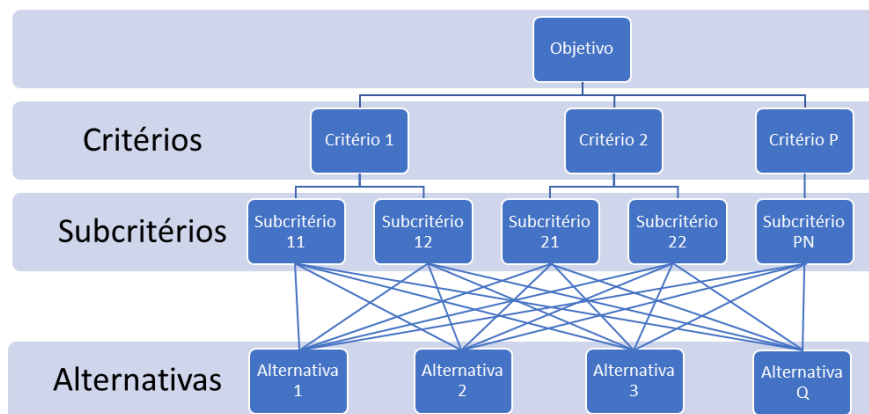
Saaty e Vargas (2012, p.1) definem que o método AHP é uma abordagem básica para a tomada de decisões e é projetado para lidar com o racional e o intuitivo, objetivando selecionar a melhor alternativa entre as avaliadas, considerando os diversos critérios. Ainda segundo eles, o tomador de decisão realiza comparações simples entre os pares que são utilizados para desenvolver prioridades e classificar as alternativas.

O Analytic Hierarchy Process (AHP) fornece a matemática objetiva para processar as preferências inescapavelmente subjetivas e pessoais de um indivíduo ou grupo na tomada de decisão. Com o AHP e sua generalização, o Analytic Network Process (ANP), primeiro constrói hierarquias ou redes de feedback, em seguida, faz julgamentos ou realiza medições em pares de elementos em relação a um elemento de controle para derivar escalas de razão que são então sintetizadas em toda a estrutura para selecionar a melhor alternativa. (SAATY; VARGAS, 2012, p. 23, tradução nossa).

Segundo Bushman e Rai (2004, p. 15), o AHP auxilia na estruturação da complexidade, medição e síntese de rankings. Estas características o tornam adequado à uma ampla gama de utilizações e é considerado uma metodologia sólida, porém de fácil implementação e entendimento, sendo amplamente utilizada e aceita. Ainda segundo os autores, o AHP fornece um meio de decompor o problema em subproblemas de entendimento mais fáceis e avaliados subjetivamente. Estas avaliações são convertidas em valores numéricos e processadas para classificar cada alternativa em uma escala numérica.

O método AHP possui etapas distintas na sua aplicação, a primeira consiste em decompor o problema ou decisão em objetivo, nas alternativas possíveis de serem escolhidas e nos critérios e subcritérios relevantes para a avaliação destas alternativas (Figura 1).

Figura 1 Estrutura do AHP



Fonte: Adaptado de Bushman e Rai (2004).

A próxima etapa é a ordenação dos elementos da estrutura para cada nível, através da criação de uma matriz de julgamentos. Cada elemento superior é utilizado para a comparação dos elementos imediatamente abaixo. Neste processo de comparação paritária é utilizada a tabela fundamental de Saaty, que visa a padronização dos julgamentos, de acordo com a dominância de um elemento sobre o outro (Tabela 1).

Tabela 1 Tabela fundamental de Saaty.

Intensidade	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada	A experiência e o juízo favorecem levemente uma atividade em detrimento à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em detrimento à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Adaptado de Saaty e Vargas (2012)

Para identificar o peso de cada critério, o vetor de prioridades w pode ser definido de diferentes formas baseado na matriz A_{ij} . Uma maneira simples é a média aritmética dos valores de cada linha da matriz normalizada. Uma formulação do tipo $Aw=nw$, conforme demonstrado na Figura 2, implica que o n é o autovalor e w é o autovetor de A_{ij} (BRUNELLI, 2015, p. 18).

Figura 2 Matriz de julgamentos e vetor de prioridades

$$Aw = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} nw_1 \\ \vdots \\ nw_n \end{pmatrix} = nw.$$

Fonte: Brunelli (2015)

Após isso, a próxima etapa é calcular a razão de consistência RC, que é a razão do índice de consistência calculado IC pelo índice de consistência tabelado IR (SAATY, 2012, p. 7-9). Segundo Bhushan e Rai (2004, p. 17) as avaliações do AHP são subjetivas, por isto o método tolera certa inconsistência. Ainda segundo eles, este índice de inconsistência pode ser calculado por $IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ e comparado com o IR, que é um número tabelado, através da expressão $RC = IC/IR$. Saaty e Vargas (2012, p. 10) sugerem que um índice menor que 0,1 é considerado adequado e os valores estão próximos à realidade.

Tabela 2 Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n

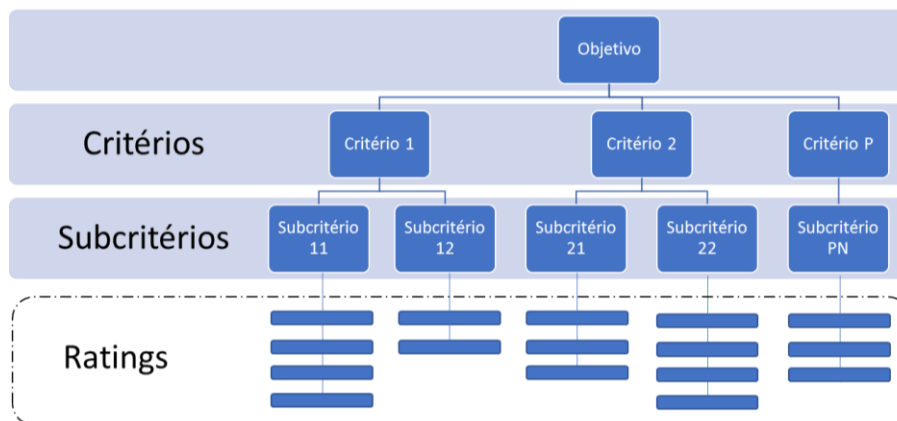
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Random consistency index (R.I.)	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

Fonte: Saaty e Vargas (2012)

A última etapa do método é a classificação de cada alternativa através da multiplicação das prioridades relativas de cada subcritério, que já considera seus pesos e os valores da matriz de julgamentos, com as prioridades de cada critério, criando a matriz de prioridades compostas, que é a classificação das alternativas (BHUSHAM e RAI, 2004, p. 17).

Entretanto quando o número de alternativas é elevado, o AHP tradicional se torna inviável de ser aplicado devido ao grande número de comparações par a par entre as mesmas. Neste caso, Saaty (2008, p. 90) apresenta um método de priorização das alternativas, conhecido como método absoluto ou AHP ratings, que estabelece escalas dentro de cada critério e prioriza seus patamares através de comparação par a par, obtendo o índice de cada um destes patamares, após isso, cada alternativa recebe a pontuação selecionando o nível de intensidade da escala apropriada para cada critério.

Figura 3 – Estrutura do AHP com Ratings



Adaptado de da Silva, Delderrain e Pantoja (2010)

No AHP ratings são utilizados os valores idealizados das prioridades, que são obtidos dividindo cada valor recebido nas matrizes de comparações pelo maior encontrado de cada matriz (Figura 3). Estes valores idealizados garantem que as escalas não assumam valores pequenos simplesmente pelo fato de possuir muitos patamares. Na abordagem AHP tradicional, as alternativas são comparadas par a par e se tornam dependentes, logo a inclusão ou exclusão de alternativas altera o ranking final destas. Na abordagem ratings, o ranking não

deve mudar jamais, visto que as alternativas são analisadas independentemente uma das outras (SAATY, 2006, p. 559-561).

A metodologia AHP é largamente utilizada principalmente pela sua facilidade de entendimento e aplicação. Entre os artigos pesquisados na indústria de petróleo, Tang et. al. (2017) utilizaram a metodologia AHP para calcular o peso dos nove fatores listados na sua determinação dos itens mais significantes na abordagem de manutenção centrada na confiabilidade, construindo um exemplo de aplicação que permitiu identificar qual dos principais componentes do sistema de bombeio de perfuração são mais críticos, baseado na opinião de 5 especialistas da área.

Dey (2001) fez uso do AHP para identificar os principais fatores de dano em cada segmento do oleoduto analisado, através da opinião de 30 profissionais. Essa classificação foi então utilizada para determinar a estratégia de manutenção e inspeção utilizada em cada segmento, assim as técnicas de identificação de descontinuidades serão mais eficientes, pois serão aplicadas baseado nos mecanismos de danos esperados no trecho específico, reduzindo custos e tempo de inspeção.

Da Silva, Beldderain e Pantoja (2010) apresentam um exemplo da abordagem AHP com ratings na indústria aeronáutica utilizado na priorização de projetos. Essa abordagem foi utilizada devido ao grande número de projetos existentes, reduzindo assim o número de comparações necessárias e propiciando a inclusão ou exclusão de alternativas sem alterar a classificação das alternativas.

Sendo assim, a utilização da metodologia AHP permitirá identificar e classificar os fatores que mais contribuem na operação das válvulas de alívio e segurança, complementada pela abordagem AHP ratings que será utilizada para indexar cada uma das válvulas.

3. CAUSAS DE DETERIORAÇÃO E AVARIAS

O método desta pesquisa visa levantar quais variáveis operacionais e características construtivas das válvulas de alívio de pressão e segurança são mais representativas no seu funcionamento e na continuidade operacional. A norma 576 do API (2017, p. 23-37) e o Guia 10 do IBP (2002, p. 7-9) citam como principais causas de avarias e deterioração das válvulas de segurança a corrosão, superfícies de assentamento danificadas, ajustes inadequados, molas danificadas, entupimento ou emperramento, especificação incorreta dos materiais, instalação inadequada, manuseio descuidado e utilização incorreta.

A corrosão está presente em processos industriais e são causas básicas de muitas avarias, o processo corrosivo danifica os componentes das válvulas, provoca depósitos que interferem no funcionamento das partes móveis, quebra de várias partes ou causa uma deterioração generalizada dos materiais das válvulas (IPB, 2002, p. 7).

Um mau funcionamento das válvulas também pode ser causado pelo travamento do disco ao bocal ou do suporte do disco ao guia, este travamento pode ser causado também pela corrosão ou por excesso de atrito entre as partes móveis, que danifica as superfícies de contato. Este atrito é causado por partículas sólidas estranhas e acarreta em severos desgastes nestas superfícies de contato (API, 2017, p. 26).

Segundo o API (2017, p. 27), as superfícies de assentamento, conhecidas também por sedes de vedação, devem ser planas, polidas e alinhadas para o correto fechamento da válvula. Existem muitas causas de danos nas superfícies de assentamento, tais como: corrosão, partículas estranhas, batimento, manuseio descuidado, vazamento após a instalação e dimensionamento inadequado.

A presença de pites ou marcas de corrosão nas superfícies de assentamento possibilita a passagem do fluido e esta passagem de fluido agrava a vedação da válvula. Partículas estranhas, provenientes de sujeira na linha a montante ou particulado presente no próprio fluido, podem danificar as superfícies de assentamento quando a válvula atua em operação ou quando é testada em bancada (IPB, 2002, p. 7-8).

O fenômeno de batimento (*chattering*) é causado quando a pressão estática é suficiente para abrir a válvula, entretanto após iniciar o fluxo, a perda de carga na linha de entrada é grande, reduzindo a força exercida no disco e causando o fechamento da válvula. Este ciclo acontece repetidas vezes e em uma frequência alta, causando um intenso batimento entre as sedes de vedação, que as danifica seriamente. Em alguns casos os danos são tão graves que não possibilitam o reparo das peças (IPB, 2002, p. 8).

Além do fenômeno de batimento, Faulk, Kashou e Trotta (2018, p. 38) incluem como fenômenos de instabilidade o *cycling* que ocorre quando a válvula atua numa frequência baixa, gerando abertura e fechamento constantes e o *fluttering*, que ocorre no momento da válvula aberta, ocasionando uma oscilação das partes móveis, porém sem o contato das sedes de vedação. Este fenômeno pode danificar as outras partes móveis da válvula devido ao atrito e ocasionar o não fechamento da válvula quando a pressão cair.

Outra causa de avaria nas válvulas, segundo o API (2017, p. 28) são as molas danificadas, que podem não exercer o esforço necessário nas sedes de vedação, resultando em uma abertura

prematura da válvula ou então uma fratura completa, que descontrolaria totalmente a PSV. Ambas as avarias geralmente são causadas por corrosão e podem ser mitigadas com a escolha de materiais mais resistentes, o emprego de pintura anticorrosiva ou utilização de válvulas balanceadas, que isolam o produto dos componentes internos, complementa o instituto.

De acordo com o API (2017, p. 30), entupimento ou emperramento é possível de acontecer quando as válvulas operam com produtos como coque, areia, demais produtos solidificados ou que possam polimerizar no interior das mesmas. A especificação dos materiais adequada é importante para as válvulas suportarem as condições operacionais, tais como temperaturas elevadas, corrosão severa ou pressões elevadas. Caso seja identificado que o material fornecido pelo fabricante não é compatível com as condições operacionais, deve-se substituir pelo material adequado (API, 2017, p. 34).

O ajuste inadequado está associado ao desconhecimento da equipe de manutenção e também à utilização de equipamentos e instrumentos impróprios ou descalibrados. A bancada de calibração deve passar por revisões periódicas e os manuais das válvulas devem estar disponíveis à força de trabalho. A instalação, manuseio ou utilização incorreta das válvulas também comprometem o seu funcionamento e está associada ao conhecimento técnico da equipe de manutenção e operação da unidade (IPB, 2002, p. 7-9).

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO

O objetivo deste trabalho consiste em analisar as válvulas de alívio de pressão e segurança e determinar quais devem ser priorizadas nas manutenções preventivas, através da criação de um índice de importância. Essa priorização se baseia na probabilidade de falha dos dispositivos e na consequência destas falhas. Estas falhas foram separadas em falha na abertura, que engloba qualquer abertura acima de 3% da pressão de ajuste ou a válvula não abrir, e as falhas de vazamento, que incluem as válvulas que abrem abaixo da tolerância da pressão de ajuste e/ou não apresentam estanqueidade.

Após análise das diversas causas de avarias dos dispositivos de alívio de pressão e segurança, foram levantados os fatores de projeto e de processo que podem ocasionar estes danos nas válvulas. Além destes, foram incluídos os fatores operacionais que contribuem para analisar a consequência das falhas nestes dispositivos, relacionados à segurança das pessoas e meio ambiente, custos e relevância operacional. Estes fatores, que no AHP são chamados de critérios, foram inseridos nos dois grupos, os que aumentam a probabilidade de falha e a

consequência da falha, sendo que alguns deles influem em ambos os grupos, conforme Figura 4.

Figura 4 – Fatores relacionados.



Fonte: Os autores

No primeiro grupo, a relação de pressão de operação pela pressão de ajuste (OP/SP) determina a probabilidade de a válvula atuar com maior frequência, que pode comprometer as superfícies de contato das partes móveis devido ao atrito, assim como danificar as sedes de vedação devido ao contato com o fluido ou danos mecânicos. Estes danos mecânicos também podem ser causados pelo regime de trabalho no qual a válvula está exposta, tais como variação de pressão, vibração, cycling, fluttering ou chattering, este último totalmente indesejável e que deve ser submetido à análise e mudanças das condições operacionais.

Outro aspecto é em relação às incrustações, que são causadas por corrosão ou por fluidos com alto grau de impureza, estas incrustações podem acarretar no travamento das partes móveis das válvulas, dificultando sua abertura. O grau de impureza dos fluidos também impacta na capacidade da válvula apresentar estanqueidade após a abertura, pois caso no momento em que a válvula fecha, ou seja, as superfícies de contato do disco e bocal se encontram, tenha algum particulado sólido entre os mesmos, estas sedes podem ser danificadas e a válvula passa então a apresentar vazamento.

A redundância é considerada como um fator que reduz a probabilidade de falha devido à possibilidade da válvula não estar alinhada para o processo, ou seja, caso tenham duas válvulas que protegem o mesmo equipamento, apenas uma delas fica operacional e a outra permanece bloqueada, reduzindo sua chance de falhar. A redundância também foi considerada como um fator no ramo de consequência de falhas devido à facilidade de comutação pela válvula redundante, no caso de falha, e na facilidade de disponibilização da válvula para manutenção, permanecendo a outra válvula em operação.

No grupo de fatores que influenciam na consequência das falhas, tratando-se da falha na abertura, existe a temperatura de operação do produto, que caracteriza em maiores riscos à segurança das pessoas e equipamentos. Outro fator é a criticidade do fluido do equipamento protegido, que pode transformar uma falha em algo catastrófico no caso de um produto inflamável ou apenas em danos localizados no caso de fluidos com potencial de risco menor.

A categoria do equipamento protegido é considerada no aspecto da consequência de falha de abertura, devido estar relacionada ao volume de produto neste equipamento. Outro fator é a distância do equipamento protegido à área de circulação e concentração de empregados ou das comunidades locais e área de tráfego, que também é pertinente no caso de uma falha na abertura.

Nos fatores de consequência de falha do tipo vazamento, o tamanho do orifício da válvula é proporcional a quantidade de produto que iria fluir pelas sedes de vedação e o custo do produto está relacionado às questões financeiras resultante da perda deste produto. O local onde a válvula direciona o produto no caso de um vazamento determina os riscos para pessoas próximas e também ao meio ambiente, sendo chamado de local de descarga. A redundância do equipamento protegido está relacionada à facilidade de disponibilizar a válvula danificada para manutenções corretivas sem comprometer a produção.

Para a formação dos pesos de cada critério, foi composto um grupo com 01 engenheiro e 04 técnicos de inspeção, que atuam mais constantemente nas atividades de inspeção e manutenção das válvulas de alívio de pressão e segurança. A coleta de informações sobre a prioridade dos critérios foi através de formulário eletrônico, conforme Figura 5, utilizando a escala fundamental de Saaty, conforme Tabela 1.

Figura 5 Modelo de avaliação de prioridades



Fonte: Os autores

As matrizes de comparação entre os critérios e subcritérios de 1º nível podem ser verificadas na Figura 6. Como são comparações apenas entre 2 alternativas, não é possível calcular a razão de consistência. Nos subcritérios de 2º nível a razão de consistência apresentou como maior valor 0,0807, abaixo do 0,1 que é considerado como o limite aceitável (Figura 7).

Figura 6 - Matrizes de comparação entre critérios e subcritérios 1º nível

Critérios					
		Probabilidade de Falha	Consequência Falha	Auto-vetor normalizado	
Probabilidade Falha		1,00	0,33	25,0%	
Consequência Falha		3,00	1,00	75,0%	
Σ :		4,000	1,333		

Subcritérios Probabilidade de Falha				Subcritérios Consequência de Falha					
		Falha na abertura prob.	Vazamento prob.	Auto-vetor normalizado			Falha na abertura cons.	Vazamento cons.	Auto-vetor normalizado
Falha na abertura prob.		1,00	0,14	12,5%	Falha na abertura cons.		1,00	9,00	90,0%
Vazamento prob.		7,00	1,00	87,5%	Vazamento cons.		0,11	1,00	10,0%
Σ :		8,000	1,143		Σ :		1,111	10,000	

Fonte: Os autores

Figura 7 - Matrizes de comparação dos subcritérios 2º nível

Falha na abertura prob.						Vazamento prob.								
Falha na abertura prob.		OP/SP	Incrustações	Regime de trabalho	Redundância	Auto-vetor normalizado	Vazamento prob.		Impureza do fluido	OP/SP	Redundância	Regime de trabalho	Auto-vetor normalizado	
	OP/SP	1,00	0,14	1,00	3,00	12,3%		Impureza do fluido	1,00	0,20	3,00	0,33	11,5%	
	Incrustações	7,00	1,00	7,00	9,00	69,4%		OP/SP	5,00	1,00	7,00	5,00	62,5%	
	Regime de trabalho	1,00	0,14	1,00	5,00	13,9%		Redundância	0,33	0,14	1,00	0,33	6,1%	
	Redundância	0,33	0,11	0,20	1,00	4,4%		Regime de trabalho	3,00	0,20	3,00	1,00	19,9%	
Σ:	9,33	1,40	9,20	18,00		Σ:	9,33	1,54	14,00	6,67				
n:	4,000	Consistente				n:	4,000	Consistente						
λ-max:	4,193					λ-max:	4,218							
IC:	0,064					IC:	0,073							
RC:	7,14%					RC:	8,07%							
Falha na abertura consequência						Vazamento consequência								
Falha na abertura consequência		Temp. Operação	Criticidade do Fluido	Cat. Equip. protegido	Equip. prot. Remoto	Auto-vetor normalizado	Vazamento consequência		Tamanho do orifício	Custo do fluido	Local de descarga	Redundância	Redun. Equip. prot.	Auto-vetor normalizado
	Temp. Operação	1,00	0,14	0,14	0,33	5,0%		Tamanho do orifício	1,00	0,33	0,33	0,20	0,33	5,8%
	Criticidade do Fluido	7,00	1,00	1,00	5,00	42,4%		Custo do fluido	3,00	1,00	5,00	0,33	0,33	17,1%
	Cat. Equip. protegido	7,00	1,00	1,00	5,00	42,4%		Local de descarga	3,00	0,20	1,00	0,20	0,20	7,3%
	Equip. prot. Remoto	3,00	0,20	0,20	1,00	10,3%		Redundância	5,00	3,00	5,00	1,00	1,00	36,7%
Σ:	18,00	2,34	2,34	11,33		Σ:	15,00	7,53	16,33	2,73	2,87			
n:	4,000	Consistente				n:	5,000	Consistente						
λ-max:	4,048					λ-max:	5,307							
IC:	0,016					IC:	0,077							
RC:	1,78%					RC:	6,86%							

Fonte: Os autores

O resultado dos pesos dos critérios e subcritérios em relação ao objetivo geral podem ser verificados na Figura 8. Foi possível observar que o critério consequência da falha tem um peso superior ao critério probabilidade da falha e que o tipo de falha na abertura é mais relevante que o tipo vazamento na consequência de falha, porém esta relação se inverte quando se analisa a probabilidade de falha.

Figura 8 - Pesos dos critérios e subcritérios

Probabilidade de falha 0,25		Consequência da Falha 0,75	
Falha na abertura	Vazamento	Falha na abertura	Vazamento
OP/SP 0,004	Impureza do fluido 0,025	Temp. de operação 0,034	Tamanho do orifício 0,004
Incrustações 0,022	OP/SP 0,133	Criticidade do Fluido 0,286	Custo do Fluido 0,013
Regime de trabalho 0,004	Redundância 0,013	Categoria do equipamento protegido 0,286	Local de descarga 0,005
Redundância 0,001	Regime de trabalho 0,044	Equipamento protegido remoto 0,069	Redundância 0,027
			Redundância do equip. protegido 0,025

Fonte: Os autores

Para cada critério foi criada uma escala de acordo com o número de classes necessárias, como exemplo: para o critério redundância, a escala só possui dois patamares, referentes a possui ou não possui, enquanto que o critério incrustações possui 05 patamares, baseado nos níveis de incrustações possíveis de serem encontrados.

Estas escalas foram hierarquizadas através de comparações par a par, resultando no autovetor normalizado e nas razões de consistências. O autovetor foi então idealizado, que consiste em dividir os valores encontrados pelo maior valor encontrado, resultando numa escala cujo maior valor será 1, conforme proposto por Saaty (2006, p. 559) no artigo que trata de ratings no AHP/ANP.

Figura 9 - Escalas dos critérios

OP/SP			Incrustações			Regime de trabalho			Redundância			
Condição	Norma lizada	Idealizada	Condição	Norma lizada	Idealizada	Condição	Norma lizada	Idealizada	Condição	Norma lizada	Idealizada	
<0,5	0,046	0,070	Válvulas balanceadas	0,033	0,065	Condição normal	0,033	0,061	Possui	0,100	0,111	
0,5<OP/SP<0,75	0,096	0,146	GLP, LGN, Propano, ar comprimido, N2	0,064	0,125	Variação de pressão	0,058	0,107	Não possui	0,900	1,000	
0,75<OP/SP<0,9	0,204	0,312	Demais fluidos de processo	0,130	0,254	Vibração	0,129	0,236				
>0,9	0,654	1,000	Óleo térmico ou lubrificante	0,264	0,517	Fluttering ou cycling	0,235	0,431				
			Água, petróleo	0,510	1,000	Chattering	0,545	1,000				
Impureza do fluido			Categoria do Equipamento protegido			Temperatura de operação			Criticidade do fluido			
Condição	Norma lizada	Idealizada	Condição	Norma lizada	Idealizada	Condição	Norma lizada	Idealizada	Condição	Norma lizada	Idealizada	
Sede resiliente	0,039	0,070	V ou não categorizado	0,033	0,065	<200°C	0,250	0,333	Água	0,033	0,065	
GLP, LGN, N2, Ar comprimido	0,126	0,223	IV	0,064	0,125	>200°C	0,750	1,000	Ar comprimido, N2	0,064	0,125	
Demais fluidos de processo	0,270	0,477	III	0,130	0,254				Óleo, fluidos combustíveis	0,130	0,254	
Fluidos com sólidos em suspensão	0,565	1,000	II	0,264	0,517				Gás Natural, inflamáveis gasosos	0,264	0,517	
			I	0,510	1,000				GLP, LGN, inflamáveis líquidos	0,510	1,000	
Equipamento protegido remoto		Tamanho do orifício		Custo do fluido			Local de descarga			Redundância do equipamento protegido		
Condição	Norma lizada	Idealizada	Condição	Norma lizada	Idealizada	Condição	Norma lizada	Idealizada	Condição	Norma lizada	Idealizada	
<100m	0,167	0,200	5,6, D, E, F	0,042	0,073	Água, Ar comprimido	0,039	0,070	Reservatório	0,055	0,098	
>100m	0,833	1,000	G, H	0,085	0,146	N2, Óleo	0,126	0,223	Flare	0,118	0,209	
			J,K,L	0,290	0,498	Gás Natural	0,270	0,477	Coletor de dreno	0,263	0,467	
			>M	0,582	1,000	GLP, LGN	0,565	1,000	Atmosfera	0,564	1,000	

Fonte: Os autores

Com as escalas de cada critério definidas e os autovetores idealizados (Figura 9), o próximo passo foi a coleta dos dados técnicos e de processo das válvulas, tais como pressão de operação e ajuste, fluido, regime de trabalho, entre outros. Baseado nestes dados, as válvulas são enquadradas nas escalas dos critérios. Os valores atribuídos em cada critério multiplicado pelo vetor prioridade dos critérios retorna o índice da válvula. Quanto maior este índice, mais críticas são as válvulas para o processo, enquanto que valores reduzidos significam válvulas menos relevantes.

5. RESULTADOS

Este trabalho analisou as 226 válvulas pertencente à um dos processos da UPGN, cujos índices encontrados neste grupo de válvulas variaram de 0,226 a 0,889, onde pode-se perceber um padrão na distribuição das válvulas, com 03 grandes grupos, conforme visto nas Figura 10 e Figura 11.

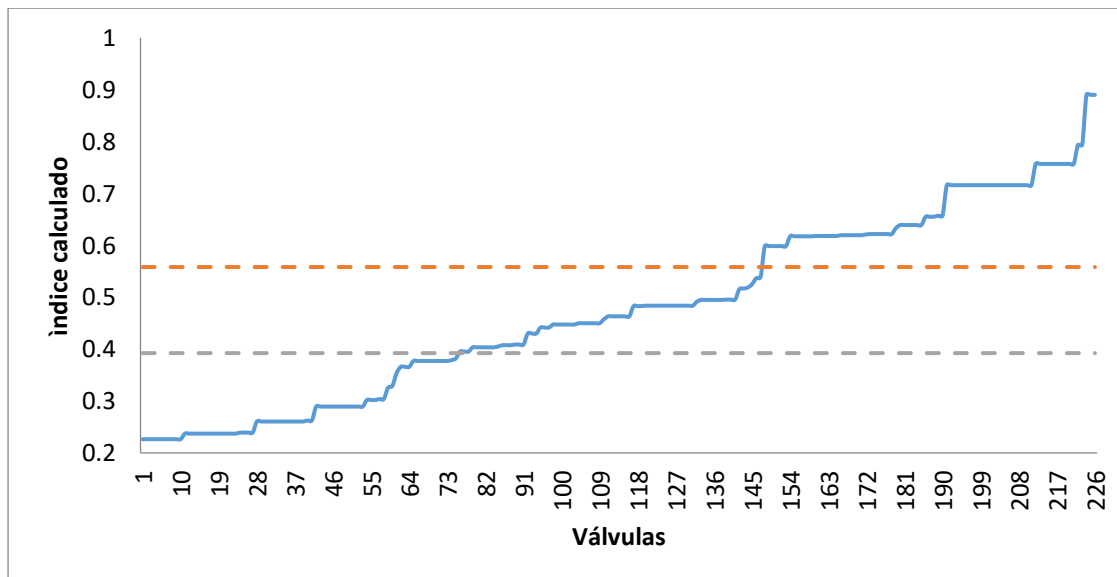
- **Grupo com índice maior:** é composto principalmente por válvulas da linha de carga da unidade, que geralmente operam com pressões são mais elevadas, em condições mais severas e os equipamentos são mais críticos para o processo, que nesta análise representou

aproximadamente 16% das válvulas. Este grupo deve ser priorizado nas manutenções preventivas;

- **Grupo intermediário:** é representado por um número maior de válvulas que o primeiro grupo, aproximadamente 38% destas, que normalmente operam com pressões medianas, fluidos mais limpos, ou equipamentos menos críticos para o processo. São as válvulas típicas do processo;

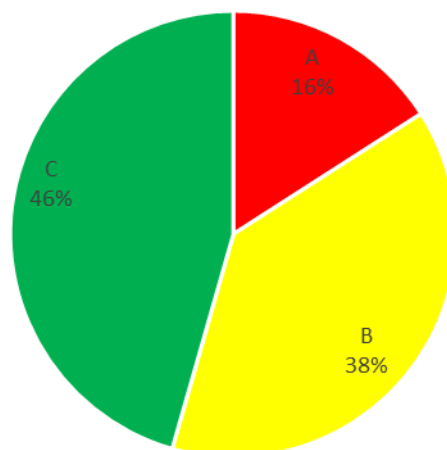
- **Grupo com índices menores:** representados principalmente pelas válvulas que operam com pressões baixas e fluidos auxiliares para resfriamento, lubrificação ou instrumentação com controle pneumático; são válvulas que não possuem grande importância para o processo ou operam em condições com baixa criticidade. Neste estudo representou aproximadamente 46% das válvulas e podem ter intervalos de manutenção preventiva maiores.

Figura 10 - Gráfico dos índices das válvulas



Fonte: Os autores

Figura 11 – Distribuição das válvulas analisadas



Fonte: Os autores

Tabela 3 - Frequência das válvulas

Classe	Frequência	Intervalo
A	103	6 anos
B	87	4 anos
C	36	2 anos

Fonte: Os autores

Atribuindo-se intervalos de inspeção para cada classe de válvulas, conforme Tabela 3, a média de prazo desta amostra analisada aumentaria de 3,01 anos para 4,59 anos, resultando em uma redução de aproximadamente 25 manutenções preventivas por ano, o que representa uma redução de custo considerável. Além disto, das 36 válvulas identificadas como mais críticas pelo modelo, em 23 casos o intervalo de inspeção seria reduzido, ou seja, estas válvulas seriam submetidas a avaliações mais frequentes que o atual, o que aumentaria a confiabilidade e segurança do processo.

6. CONCLUSÃO

O Método AHP se mostrou eficaz na determinação dos fatores que mais contribuem na operação das válvulas de alívio de pressão e segurança, sendo complementado pela abordagem AHP ratings, que possibilitou indexar cada válvula analisada através da correlação dos seus dados de projeto e operacionais com o peso de cada um destes fatores.

Este índice atribuído a cada válvula fornece subsídios para os gestores na elaboração do plano de manutenção preventiva, atribuindo intervalos de inspeção mais curtos para as válvulas que apresentam maiores índices de criticidade e intervalos maiores para as válvulas que tenham índices mais baixos. Na simulação realizada, a média geral dos intervalos

umentaria, proporcionando uma redução de custos para a empresa, porém para as válvulas mais críticas, em alguns casos o intervalo de inspeção seria reduzido.

Esta definição do intervalo de manutenção pela criticidade proporciona um aumento da confiabilidade e segurança devido ao acompanhamento mais rigoroso das válvulas críticas e uma redução de custos proporcionada pela menor frequência de manutenção daquelas que são menos cruciais para o processo.

Devido ao grande número de válvulas de alívio de pressão e segurança, a abordagem AHP ratings se mostrou de grande eficiência, reduzindo o tempo de análise e ainda permite a inclusão de outras válvulas ao longo do processo sem impactar nos resultados já obtidos. Como proposta de trabalhos futuros, sugere-se um estudo de sensibilidade dos fatores de definição da criticidade das válvulas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 510: Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration**. Washington, 2014.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 520: Sizing, Selection and Installation of Pressure-relieving Devices: part 1 – Sizing and Selection**. Washington, 2014.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 520: Sizing, Selection and Installation of Pressure-relieving Devices: part 2 - Installation**. Washington, 2015.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 521: Pressure-Relieving and Despressuring Systems**. Washington, 2014.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 576: Inspection of Pressure-Relieving Devices**. Washington, 2017.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 581: Risk-Based Inspection Methodology**. Washington, 2016.

BHUSHAN, Navneet; RAI, Kanwal. **Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process**. London: Springer, 2004.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR-13: Caldeiras, Vasos de pressão e tubulação**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR13.pdf>>. Acesso em: 28 dez. 2017.

BRUNELLI, Matteo. **Introduction to the analytic hierarchy process**. Helsinki: Springer, 2015.

DEY, Prasanta. A risk-based model for inspection and maintenance of cross-country petroleum pipeline. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**. V. 7, p. 25-43, 2001.

FAULK, Nancy; KASHOU, Charles; TROTTA, Thiago. Pressure Relief Valve Inspection Interval. **Process Safety Progress**, v. 37, p. 37 – 41, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS – IBP. **Inspeção de válvulas de segurança e alívio**. Rio de Janeiro: IBP, 2002.

PETROBRAS. **N-2368 - Inspeção, manutenção, calibração e teste de dispositivos de alívio de Pressão**. Rio de Janeiro: NORTEC, 2016.

SAATY, Thomas; VARGAS, Luis. **Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process**. 2. ed. New York: Springer, 2012.

SAATY, Thomas. Decision making with the analytic hierarchy process. **Int. J. Services Science**, v. 1, p. 83 – 98, 2008.

SAATY, Thomas. Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network process. **European journal of Operational Research**, v. 168, p. 557 – 570, 2006.

da SILVA, Amanda; BELDERRAIN, Mischel; PANTOJA, Francisco. Prioritization of R&D projects in the aerospace sector: AHP method with ratings. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 2, p. 339 – 348, 2010.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Materiais para equipamentos de processo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1986.

TANG, Yang et. al. A framework for identification of maintenance significant item in reliability centered maintenance. **Energy**, v. 118, p. 1295 - 1303, 2017.