

Pós-Graduação

Segurança de Processos



DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO PARA VÁLVULAS DE SEGURANÇA (PSV) EM FPSOS

Bernardo Viestel, Priscila Alexandre, Renan Brandão, Thiago Andrade, Luiz Roberto Marques Albuquerque

RESUMO

As válvulas de segurança (PSVs) desempenham um papel crucial na segurança operacional das unidades de produção offshore, garantindo a proteção contra situações de emergência, como excesso de pressão nos equipamentos. No entanto, a falta de monitoramento contínuo das PSVs pode levar a falhas operacionais, resultando em riscos potenciais para as instalações e para o meio ambiente.

Nesse contexto, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento das PSVs em FPSOs, com o objetivo de aprimorar a segurança e a confiabilidade das operações, através da utilização da instrumentação existente para coletar dados em tempo real, poderá ajudar na avaliação do desempenho das válvulas.

Além disso, o sistema será capaz de realizar análises em tempo real dos dados coletados, identificando anomalias e alertando os operadores sobre possíveis falhas e desvios ou necessidade de manutenção. Isso permitirá uma ação proativa para evitar problemas mais graves, além de otimizar os intervalos de manutenção, reduzindo custos e aumentando a eficiência operacional.

Espera-se que o sistema de monitoramento traga benefícios significativos para a indústria offshore, proporcionando um maior controle e segurança operacional das PSVs em FPSOs, contribuindo para a redução de incidentes e aprimorando a eficiência e confiabilidade das operações.

Palavras-chave: PSV (Pressure Safety Valves), FPSO, monitoramento, pressão.

ABSTRACT

Pressure Safety Valves (PSVs) play a crucial role in the operational safety of offshore production units, ensuring protection against emergency situations such as overpressure in equipment. However, the lack of continuous monitoring of PSVs can lead to operational failures, resulting in potential risks to facilities and the environment.

In this context, the development of a PSV monitoring system in FPSOs, aiming to enhance safety and reliability of operations through the utilization of existing instrumentation for real-time data collection, may assist in evaluating valve performance.

Furthermore, the system will be capable of conducting real-time analyses of collected data, identifying anomalies, and alerting operators to potential failures or maintenance needs. This will enable proactive action to prevent more severe problems, optimizing maintenance intervals, reducing costs, and enhancing operational efficiency.

It is anticipated that the monitoring system will bring significant benefits to the offshore industry, providing greater control and operational safety of PSVs in FPSOs, contributing to incident reduction and improving the efficiency and reliability of operations.

Keywords: *PSV (Pressure Safety Valves), FPSO, monitoring, pressure.*

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, a segurança de processos vem ganhando maior ênfase nos processos industriais que lidam com substâncias perigosas e operações complexas, especialmente em função do potencial gravidade de acidentes e suas consequências. Dentre as diversas áreas nas quais a segurança de processos assume um papel de extrema relevância, destaca-se o setor de óleo e gás, especialmente unidades de processamento *offshore*, como as do tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*). Estas unidades são responsáveis pelo processamento primário do petróleo, que tem como principais objetivos a separação das fases do petróleo e posteriormente o tratamento de suas fases (BRASIL; ARAÚJO; SOUSA, 2012). Além de todos os desafios inerentes a qualquer unidade *offshore*, os FPSOs lidam com condições operacionais extremas, incluindo processamento de fluidos inflamáveis e potencialmente nocivos à saúde humana e operações em altas temperaturas e pressões, sendo esta última responsável por diversos acidentes ocorridos em indústrias ao longo dos anos.

Nas unidades de processamento do tipo FPSO, as válvulas de alívio e segurança são dispositivos fundamentais para prevenção de acidentes graves, compondo em diversos casos a última barreira preventiva antes de uma perda de contenção primária (OKOH; HAUGEN; VINNEM, 2016). As PSVs (*Pressure Safety Valves*) aliviam a pressão de vasos, tubulações e diversos equipamentos em cenários de pressurização exageradas. O funcionamento de uma PSV é simples e baseia-se em princípios mecânicos. Em uma situação na qual a pressão do fluido excede o limite pré-definido para aquele equipamento ou tubulação, há a atuação da válvula de segurança. Estas válvulas possuem usualmente um disco ou obturador que é mantido pressionado contra uma abertura de saída por meio de um mecanismo de retenção. À medida que a pressão interna atinge o ponto de ajuste determinado, a força exercida pelo fluido sobre o disco da PSV se torna maior do que a força que a mantém fechada. Nesse momento, a válvula se abre rapidamente, permitindo que o fluido em alta pressão escape para uma área de menor pressão, como uma atmosfera externa ou um sistema de coleta apropriado (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2000). Esse processo de alívio de pressão é crucial para evitar danos aos equipamentos, vazamentos perigosos e potenciais riscos à segurança, garantindo que a pressão interna do sistema permaneça dentro de limites seguros.

Um dos fatores que garantem alta confiabilidade a válvulas do tipo PSV provém de sua natureza totalmente mecânica, independente de alimentação elétrica ou pneumática, para seu pleno funcionamento. Este modo de operação, que torna as PSVs tão fundamentais em uma planta de processamento de um FPSO, acaba criando uma lacuna na capacidade de rastrear seu desempenho e, conseqüentemente, avaliar a integridade da barreira de segurança que representam. Diferentemente de outros instrumentos que estão integrados aos sistemas de automação da unidade, as PSVs não enviam qualquer sinal de sua atuação em caso de cenários potencialmente perigosos, perdendo-se a rastreabilidade de quais válvulas estão sendo mais demandadas e da sua eficiência nos momentos de operação. Além disso, a falta de informação pode potencializar um cenário de existência de falhas ocultas que muitas vezes serão somente percebidas em inspeções periódicas ou caso algum cenário potencialmente perigoso se concretize em um acidente de processo (CHEDDIE; GRUHN, 2006).

O presente trabalho visa tornar mais robusta a camada de segurança associada às válvulas de segurança do tipo PSV, garantindo uma maior integridade desta camada, propondo a estruturação de um monitoramento voltado para as válvulas do tipo PSV. A solução proposta busca utilizar a instrumentação já existente em FPSOs, principalmente instrumentos de pressão dos sistemas de controle e intertravamento das unidades. Estes instrumentos, além de cumprir sua função primária, fazem leitura das variáveis de processo às quais as válvulas de alívio estão submetidas. Esses dados, caso a companhia possua a infraestrutura adequada, podem ser armazenados e analisados sob uma ótica multivariável. A partir dessa abordagem, torna-se possível determinar o comportamento das PSVs quando expostas a diferentes condições de processo, permitindo a detecção precoce de falhas e o monitoramento contínuo de seu funcionamento. Este monitoramento, além de aprimorar a segurança das unidades, agregando maior confiabilidade a esta barreira preventiva, permite uma melhoria nos planos de manutenção das válvulas de segurança, tornando-os mais eficientes.

Em um segundo momento, o trabalho objetiva avaliar os resultados do monitoramento previamente proposto, identificando seus possíveis ganhos para a integridade das válvulas de segurança.

1.1. Objetivo geral

Desenvolver e implementar um sistema abrangente de monitoramento e análise de válvulas de segurança do tipo PSV em unidades de processamento FPSO, visando

aprimorar a integridade e confiabilidade das barreiras preventivas de segurança nessas instalações industriais.

Este objetivo geral engloba todas as etapas do processo de desenvolvimento e implementação do sistema de monitoramento, desde a identificação dos parâmetros de operação até a validação e recomendações para otimização dos planos de manutenção, com o propósito de garantir a máxima eficácia na prevenção de acidentes em unidades FPSO.

1.2. Objetivos específicos

- Identificar os principais parâmetros de operação das válvulas de segurança do tipo PSV em unidades FPSO, incluindo pressão, temperatura e fluxo de processo.
- Avaliar a viabilidade e eficácia da integração dos dados provenientes dos instrumentos de pressão e controle das unidades FPSO para o monitoramento das PSVs.
- Implementar um sistema de monitoramento em tempo real que permita a detecção precoce de falhas e o acompanhamento contínuo do desempenho das PSVs.
- Validar a eficiência do sistema proposto por meio de simulações e testes em ambiente controlado e em unidades de processamento reais.
- Propor recomendações para aprimorar os planos de manutenção das válvulas de segurança com base nos dados obtidos pelo sistema de monitoramento integrado.

2. DESENVOLVIMENTO

A natureza estritamente mecânica das válvulas de segurança dificulta o monitoramento desses dispositivos, uma vez que não há dados diretos de sua operação, tornando-as suscetíveis a falhas ocultas. Para superar essa adversidade e construir um monitoramento eficaz, propõe-se utilizar a instrumentação existente das unidades offshore, que indiretamente nos proporcionam informações sobre a operação das PSVs.

Dentre os possíveis instrumentos que poderiam ser utilizados na construção de diversas metodologias de monitoramento, este trabalho foca nos transmissores de pressão. Tal escolha justifica-se pelo fato de a pressão ser a principal variável de processo quando tratamos de dispositivos de alívio, permitindo assim a construção de uma associação mais direta entre os dados fornecidos por tais instrumentos e as válvulas a serem monitoradas.

Em função de sua importância para a metodologia deste trabalho, é relevante que sejam apresentadas as principais características dos transmissores de pressão e das válvulas de segurança do tipo PSV.

2.1. Transmissores de Pressão

Transmissores de pressão são dispositivos utilizados para medir e transmitir informações sobre a pressão de um fluido, como líquidos ou gases. Eles desempenham um papel fundamental em várias aplicações industriais e de controle de processos, permitindo monitorar e controlar a pressão em sistemas e processos críticos. Estes instrumentos são compostos pelos seguintes componentes:

- **Transmissão do Sinal:** O sinal condicionado é transmitido a um dispositivo de exibição ou controle, como um sistema de monitoramento, controlador de processo ou sistema de aquisição de dados.
- **Sensor de Pressão:** O componente essencial de um transmissor de pressão é o sensor de pressão. Este sensor é projetado para detectar a pressão do fluido com o qual está em contato. Existem diversas tecnologias de sensores de pressão. As principais e mais utilizadas são listadas nos subitens a seguir.
 - **Sensor de Pressão Piezoelétrico:** Este tipo de sensor utiliza cristais piezoelétricos que geram uma carga elétrica proporcional à pressão aplicada. É amplamente utilizado devido à sua alta sensibilidade e resposta rápida.
 - **Sensor de Pressão Capacitivo:** Nesse tipo de sensor, a pressão aplicada causa uma mudança na capacitância de um elemento sensor. Essa mudança é convertida em um sinal elétrico proporcional à pressão. Os sensores capacitivos são conhecidos por sua alta precisão e estabilidade.
 - **Sensor de Pressão Resistivo:** Esse tipo de sensor utiliza uma fina camada resistiva que é deformada pela pressão aplicada. Essa deformação causa uma mudança na resistência, que é medida e convertida em um sinal elétrico proporcional à pressão.
 - **Sensor de Pressão de Silício:** É um tipo de sensor que utiliza tecnologia de microprocessador de silício para medir a pressão. Ele consiste em um diafragma de silício com sensores de tensão embutidos, que medem a deformação causada pela pressão aplicada.

- Sensor de Pressão de Fibra Óptica: Nesse tipo de sensor, a pressão aplicada causa uma mudança na propriedade de transmissão de luz em uma fibra óptica. Essa mudança é convertida em um sinal elétrico proporcional à pressão.

Além dos componentes dos transmissores de pressão estes instrumentos podem ser classificados de acordo com o tipo de medição realizada, com os principais tipos listados abaixo:

- Transmissores de pressão absoluta: Medem a pressão em relação ao vácuo absoluto;
- Transmissores de pressão relativa: Medem a pressão em relação à pressão atmosférica local;
- Transmissores de pressão diferencial: Medem a diferença de pressão entre dois pontos em um sistema.

Outra característica importante dos transmissores de pressão é sua faixa de leitura, comumente chamada de range de leitura. Esta faixa indica os valores mínimos e máximos que um determinado dispositivo consegue medir.

Tal característica é definida pelo fabricante do instrumento e não pode ser alterada. Além da faixa de leitura do instrumento, existe a faixa de pressão calibrada ou range calibrado do instrumento. Diferentemente da faixa anterior, esta é definida pela indústria que utiliza o transmissor, levando em consideração a realidade de operação da planta. O range calibrado sempre está contido dentro do range do instrumento.

2.2. Válvulas de segurança (*Pressure Safety Valve - PSV*)

Uma válvula de segurança, também conhecida como válvula de alívio de pressão ou PSV (*Pressure Safety Valve*), é um dispositivo de segurança projetado para proteger equipamentos, tubulações e sistemas contra danos causados por pressões excessivas. Essas válvulas são essenciais em uma variedade de aplicações industriais, onde o controle preciso da pressão é fundamental para a segurança e eficiência do processo.

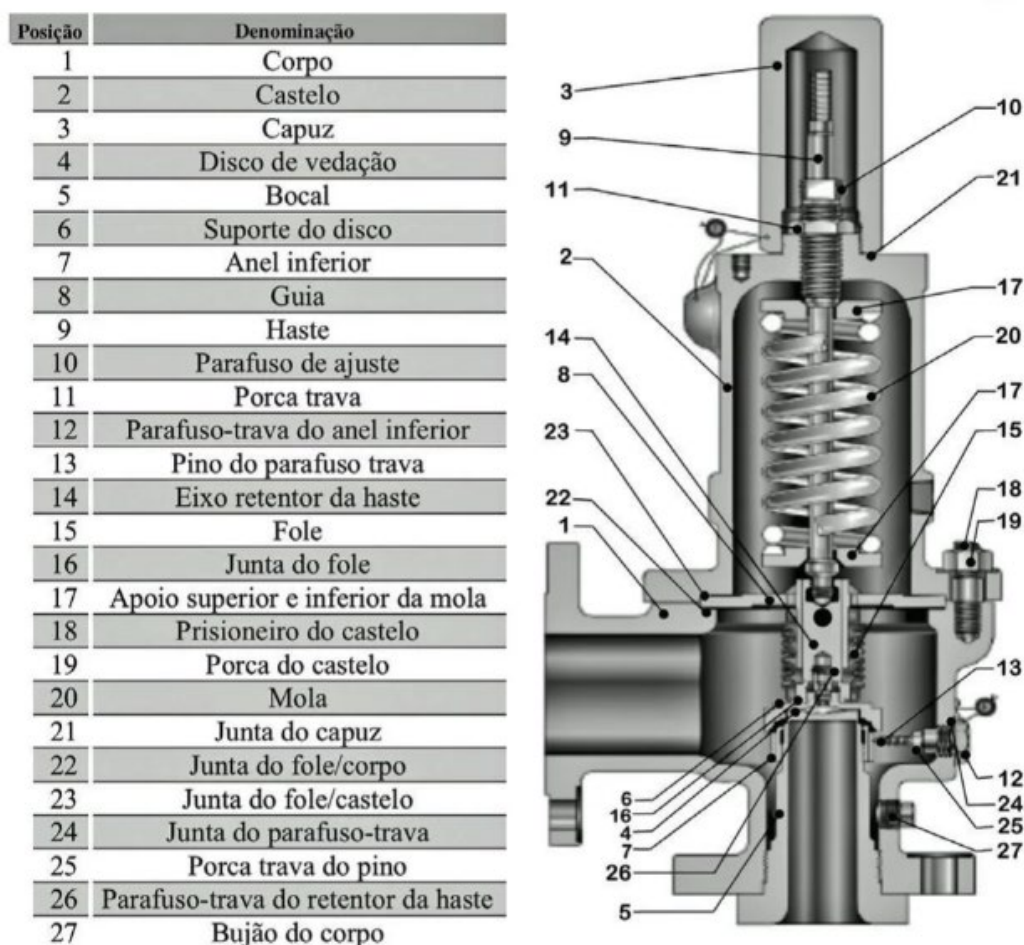
A função principal de uma válvula de segurança é aliviar a pressão interna de um sistema quando ela atinge um valor pré-definido, conhecido como "pressão de ajuste" ou "pressão de abertura". Quando a pressão do fluido dentro do sistema excede esse limite,

a válvula se abre automaticamente, permitindo que parte do fluido seja liberado para um ambiente de pressão mais baixa, como a atmosfera ou um sistema de alívio adequado.

As válvulas de segurança são dispositivos totalmente mecânicos e independentes de fontes de energia externas, o que garante sua operação mesmo em situações de emergência, como falhas de energia. Elas geralmente consistem em um disco ou obturador mantido pressionado contra uma abertura de saída por meio de um mecanismo de retenção. Quando a pressão interna excede a pressão de ajuste, a força exercida pelo fluido sobre o disco supera a força de retenção, fazendo com que a válvula se abra rapidamente para aliviar a pressão excessiva.

Essas válvulas desempenham um papel crítico na proteção de equipamentos e pessoal contra os riscos associados a pressões elevadas, como explosões, danos estruturais e vazamentos perigosos. Sua instalação e manutenção adequadas são essenciais para garantir a segurança e o funcionamento confiável dos sistemas industriais.

Figura 1 – Esquemático de uma PSV



Fonte: Adaptado de API 520

Válvulas de segurança são usualmente a última barreira preventiva de segurança, como exemplificado na Figura 2, que ilustra as barreiras preventivas e mitigadoras de segurança para uma determinada planta de processo.

Figura 2 - Modelo do queijo suíço.



Fonte: Petrobras (2019)

A operação mecânica de uma PSV contempla diversas etapas, que ocorrem durante o ciclo de abertura da válvula, que serão brevemente descritas a seguir:

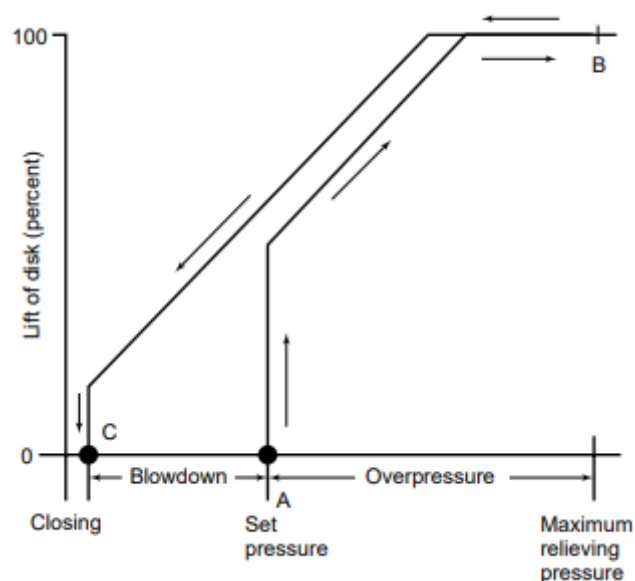
1. Pressão de ajuste: A PSV é ajustada para abrir em uma determinada pressão de ajuste, que é o valor máximo permitido para o sistema. Quando a pressão do sistema atinge esse limite, a válvula deve abrir.
2. Pressão de abertura: A pressão de abertura é o valor no qual a válvula começa a abrir. Geralmente, a pressão de abertura é ligeiramente superior à pressão de ajuste, para evitar aberturas desnecessárias devido a flutuações normais de pressão.
3. Curso de abertura: Quando a pressão do sistema atinge a pressão de abertura, a válvula começa a abrir. Isso é alcançado através do deslocamento de um disco ou cone de vedação que estava mantendo o fluxo bloqueado. À medida que a válvula se abre, o fluido começa a fluir através dela.

4. Pressão de fechamento: A válvula de segurança possui uma pressão de fechamento, que é o valor de pressão no qual a válvula começa a fechar. Essa pressão é inferior à pressão de ajuste e é ajustada para garantir que a válvula feche adequadamente quando a pressão do sistema diminuir.
5. Curso de fechamento: À medida que a pressão do sistema diminui abaixo da pressão de fechamento, a válvula começa a fechar. O disco ou cone de vedação retorna à sua posição inicial, bloqueando o fluxo do fluido. O curso de fechamento pode variar dependendo do projeto da válvula e das condições de operação.

A válvula é projetada para abrir rapidamente quando a pressão ultrapassa o limite pré-ajustado e fechar quando a pressão retorna a um nível seguro. Isso garante a proteção contínua do equipamento e a segurança do sistema.

A Figura 3 exemplifica o funcionamento descrito acima. No ponto A (Pressão de ajuste) a válvula entra no seu curso de abertura. Caso a abertura da PSV seja suficiente para alcançar a pressão de fechamento, a válvula entra no seu curso de fechamento, até o ponto C, onde a válvula encontra-se fechada. Vale ressaltar que as PSVs possuem uma pressão de alívio máxima, onde a abertura da válvula se mantém em 100%, mas não é suficiente para reduzir a pressão (Ponto B).

Figura 3 – Abertura da PSV (válvula de segurança) x Pressão



Fonte: Adaptado de API 520

Assim, como outras válvulas, as PSVs também estão suscetíveis a falhas. Algumas das principais falhas das válvulas PSV incluem:

- Bloqueio: Esta falha ocorre quando a válvula não consegue abrir completamente ou permanece presa na posição fechada. Isso pode ocorrer devido a detritos, corrosão, acúmulo de sedimentos ou problemas mecânicos internos.
- Vazamento: As válvulas PSV podem apresentar vazamentos, mesmo quando estão fechadas. Isso pode ocorrer devido a danos nas vedações, desgaste dos componentes internos, corrosão ou danos físicos. Os vazamentos podem levar a perdas de pressão e comprometer a segurança do sistema.
- Falso alívio: Esse tipo de falha ocorre quando a válvula PSV abre desnecessariamente, liberando pressão do sistema mesmo quando não há uma condição de sobrepressão. Isso pode resultar em perda desnecessária de fluidos, aumento dos custos operacionais e interrupções indesejadas no processo.
- Ruído excessivo (*chattering*): O fenômeno do *chattering* é caracterizado por vibrações e ruídos excessivos da válvula durante sua operação. Isso pode ocorrer devido a um mau dimensionamento da válvula, instalação inadequada, pressão de abertura incorreta ou problemas com os componentes internos. O *chattering* pode causar desgaste prematuro da válvula, danos aos componentes e redução da vida útil.
- Falha na abertura: Em algumas situações, a válvula PSV pode falhar em abrir quando necessário, mesmo em condições de sobrepressão. Isso pode ocorrer devido a problemas de ajuste, bloqueio mecânico, corrosão ou falhas nos mecanismos de acionamento.

2.3. Construção do monitoramento das PSVs

O monitoramento proposto neste trabalho é baseado na associação entre transmissores de pressão e válvulas de segurança, de forma que a pressão medida pelo transmissor seja próxima à pressão sentida pela válvula de segurança, permitindo assim a leitura em tempo real de uma variável de processo que indiretamente pode indicar diferentes situações de falha desta válvula.

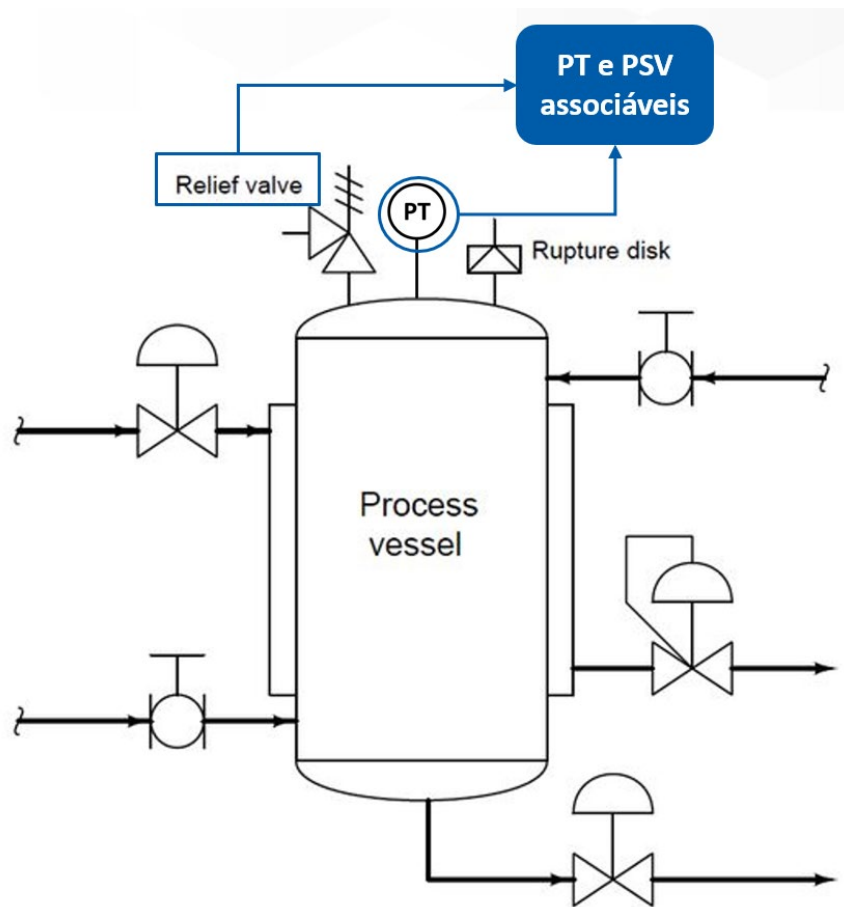
Esta metodologia é baseada na utilização da instrumentação já existente em FPSOs, sem a necessidade imediata de instalar novos instrumentos. Entretanto, alguns requisitos devem ser cumpridos para que esta metodologia possa ser implementada. A seguir, serão descritos os passos para implementação do modelo de monitoramento proposto, ressaltando em cada um deles, as condições que podem limitar sua implementação.

2.3.1. Levantamento da documentação técnica

Para que seja criada a associação entre as válvulas de segurança e os transmissores de pressão é necessário levantar a documentação técnica da unidade de processamento. Através da documentação é possível levantar quais válvulas possuem transmissores de pressão instalados em sua proximidade, cuja leitura de pressão pode ser utilizada para medir a pressão sentida pela PSV (exemplificado na Figura 4). Para que esta etapa tenha sucesso, é fundamental que a companhia mantenha sua documentação técnica organizada e atualizada.

A partir da documentação levantada, cria-se uma relação associando as PSVs a um ou mais transmissores de pressão. É importante ressaltar que é muito provável que nem todas as válvulas tenham pelo menos um transmissor de pressão próximo. Naturalmente, é possível instalar novos instrumentos que possibilitem o monitoramento das PSVs enquadradas nesta condição, porém, inicialmente, estas válvulas não foram incluídas no escopo do monitoramento proposto neste trabalho, em alinhamento à premissa inicial de usar a instrumentação já existente na unidade.

Figura 4 – Exemplo de sistema onde existe a associação entre a PSV e o instrumento de pressão.

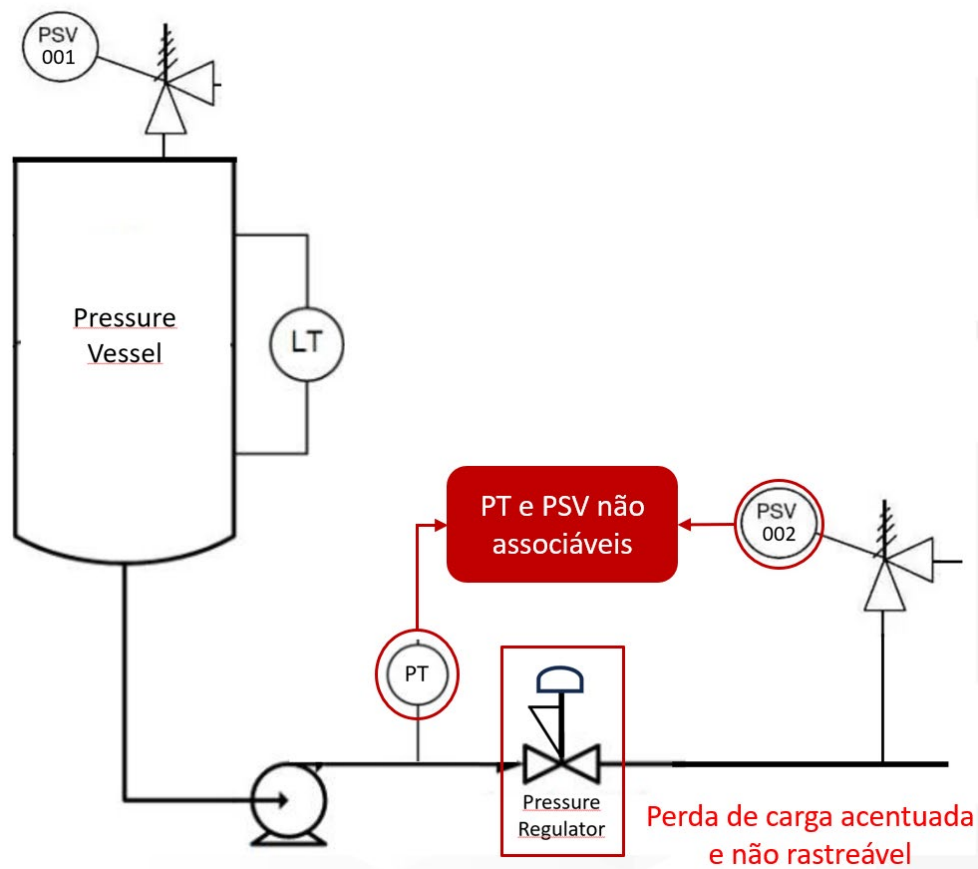


Fonte: Elaboração própria, 2024

2.3.2. Avaliação da compatibilidade de pressão entre transmissor e PSV

Após o levantamento inicial, é necessário avaliar se a pressão medida pelo transmissor de pressão de fato pode ser considerada muito próxima à pressão sentida pela PSV. Nesta etapa, ainda utilizando a documentação técnica do FPSO, é levantado se há elementos que gerem um aumento ou diminuição significativa de pressão entre o transmissor e a válvula de segurança, exemplificado na Figura 5, onde a leitura do instrumento de pressão, não estará compatível com o ajuste de pressão da PSV, pelo fato que entre os dois elementos, existe uma válvula de controle, que provoca uma perda de carga acentuada no sistema.

Figura 5 – Exemplo de sistema onde não existe a associação entre a PSV e o instrumento de pressão.



Fonte: Elaboração própria, 2024

Nesta etapa é importante avaliar as especificidades de cada caso, levando em conta os conceitos de fluido e termodinâmica, para garantir que a pressão lida pelo instrumento esteja próxima o suficiente da pressão a qual a válvula está exposta, confirmando as associações descritas no item anterior. Em função das especificidades citadas, não é recomendável o desenvolvimento de uma metodologia geral para este processo, porém, é relevante citar alguns elementos recorrentes que inviabilizam a associação entre válvula e transmissor, caso estejam posicionados entre os dois:

- Bombas ou Compressores;
- Válvulas reguladores de pressão auto-operadas;
- Turbinas expansoras;
- Tanques expansores.

Ao final desta etapa, é esperado que uma parcela de válvulas que foram incluídas inicialmente no escopo do monitoramento, sejam removidas em função da incompatibilidade entre as pressões lida pelo transmissor e sentida pela PSV.

2.3.3. Cálculo da correção de pressão entre o instrumento e a PSV

Uma vez feita a associação entre válvulas de segurança e transmissores de pressão e eliminadas associações cujas pressões são incompatíveis, é importante garantir que a leitura de pressão do transmissor seja a mais aderente possível à pressão sentida pela válvula de segurança. Em alguns cenários, as posições de instalação já garantem que as pressões sejam próximas o suficiente. Em outros casos, no entanto, existem diferenças hidrostáticas ou elementos que geram uma perda de carga, distribuída ou localizada, entre a válvula e o instrumento. Tais elementos são diferentes dos mapeados no item anterior, pois apesar de gerarem uma diferença nas pressões entre os dois pontos de interesse, esta diferença pode ser calculada, mantendo-se a rastreabilidade da pressão a qual a PSV está submetida.

Para garantir a maior assertividade do monitoramento, deve-se levantar as válvulas que estão na situação descrita anteriormente, e calcular a diferença de pressão entre o transmissor e a PSV, gerando assim um fator de correção na leitura de pressão do instrumento que representa a pressão da válvula. Naturalmente, a diferença de pressão em muitos cenários vai depender da situação operacional da planta, em função das parcelas dinâmicas de perda de carga. Visando simplificar os cálculos, é sugerido que se utilize um cenário conservador de operação da unidade offshore, gerando um fator de correção constante, uma vez que fatores de correção dinâmicos tornariam mais complexo o monitoramento, inclusive sobrecarregando as ferramentas utilizadas pelo usuário com cálculos processados em tempo real.

2.3.4. Identificação do cenário de dimensionamento das PSVs

Concluídas as associações, deve-se verificar o cenário para o qual as válvulas de segurança foram dimensionadas. Segundo a API 520, os limites de pressão acumulada são determinados de acordo com o cenário para o qual a PSV foi dimensionada e o número de dispositivos de alívio instalados, conforme a Quadro 1.

Quadro 1 - Limites de pressão acumulada para dispositivos de alívio

Contingência	Instalações com um único dispositivo		Instalações com múltiplos dispositivos	
	Pressão máxima de ajuste %	Pressão máxima acumulada %	Pressão máxima de ajuste %	Pressão máxima acumulada %
Outros cenários				
Primeiro dispositivo de alívio	100	110	100	116
Dispositivos adicionais	—	—	105	116
Cenários de incêndio				
Primeiro dispositivo de alívio	100	121	100	121
Dispositivos adicionais	—	—	105	121
Dispositivos suplementares	—	—	110	121
NOTA Todos os valores são porcentagens da pressão máxima de trabalho permitida.				

Fonte: Adaptado de API 520

Deverá ser incluído no levantamento das válvulas que serão monitoradas as informações de seu *setpoint* e da máxima pressão acumulada permitida. Estas informações permitem inferir qual faixa de pressão deve ser monitorada para que seja possível identificar as possíveis falhas das PSVs. Recomenda-se que a faixa de pressão monitorada atinja minimamente a máxima pressão acumulada permitida.

2.3.5. Avaliação da compatibilidade dos *setpoints* das PSVs e *range* dos instrumentos

Sendo conhecidas as faixas de pressão que devem ser monitoradas para cada válvula, é necessário verificar se os transmissores instalados nas unidades são capazes de medir toda a faixa de pressão requerida da PSV a qual este instrumento foi associado. Esta verificação pode ser feita através da documentação técnica dos transmissores e deve-se garantir que o range calibrado do instrumento engloba a faixa de monitoramento.

Caso a premissa anterior não seja atendida, pode ser avaliado se o range total do instrumento englobaria a faixa de interesse. Nesse caso, poderia ser feito um ajuste da faixa calibrada do instrumento, avaliando os possíveis impactos operacionais deste ajuste.

No caso do range total do instrumento não atender à premissa, poderá ser estudada a substituição do instrumento existente por um transmissor com uma faixa de leitura mais ampla. A substituição implicaria em um gasto adicional para a unidade, o que não estaria alinhado com a premissa inicial deste trabalho de utilizar somente a instrumentação

existente no FPSO. Ressalta-se, no entanto, que, diferentemente da instalação de um instrumento que não consta no projeto da plataforma, a substituição de um instrumento já existente com defeito original, tende a ser menos onerosa e pode ser feita, aproveitando uma parada operacional.

As substituições e calibrações dos instrumentos existentes deve ser avaliada pela operação da unidade e caso não seja realizada, as válvulas cujos instrumentos não possuem faixa de leitura compatível com a faixa de monitoramento, devem ser retiradas do escopo.

Ao fim deste passo, é concluída a associação entre as válvulas de segurança e os transmissores, determinando assim o escopo das PSVs que serão monitoradas. A Tabela 1 exemplifica as informações levantadas nos passos anteriores.

Tabela 1 – Exemplo de relação de PSVs incluídas no monitoramento

PSV	Transmissores de Pressão	Setpoint PSV (kPa)	Máxima pressão acumulada	Faixa de Monitoramento (kPa)		Range calibrado do transmissor (kPa)
				Limite Inferior	Limite Superior	
PSV-001A	PIT-003A	600	116%	0	696	0 a 750
PSV-001B	PIT-003B	600	116%	0	696	0 a 750
PSV-002	PIT-005	1500	110%	0	1650	0 a 2000
PSV-003	PIT-012 PIT-013	2000	121%	0	2420	0 a 2500 0 a 3000
PSV-004	PIT-107	3000	110%	0	3300	0 a 3500

Fonte: Elaboração própria, 2024

2.3.6. Verificação da infraestrutura de dados disponíveis para o usuário

Concluída a associação entre transmissores e válvulas, é necessário garantir que a infraestrutura dos FPSOs a serem monitorados, e de sua respectiva empresa, seja capaz de transmitir os dados dos instrumentos de pressão em tempo real para a sede da empresa, para que os dados gerados possam ser analisados por equipes que não estejam embarcadas.

Além da infraestrutura para transmissão do sinal, é importante garantir que a empresa possua licenças de softwares adequados para analisar os dados gerados e que a taxa de atualização desses dados permita uma visão instantânea da situação operacional das válvulas.

Concluindo-se a metodologia proposta nos itens anteriores, os dados gerados pelos transmissores de pressão estão prontos para serem analisados. Os itens subsequentes irão detalhar as formas como esses dados podem ser analisados e quais falhas poderiam ser identificadas nas válvulas.

2.4. Implementação do monitoramento das válvulas de segurança

Até o item anterior, foram descritos os passos e os requisitos necessários para a estruturação do monitoramento das válvulas de segurança de um FPSO. A seguir abordaremos as diferentes formas de implementar o monitoramento descrito no cotidiano da operação de uma unidade e abordar casos nos quais o monitoramento foi bem-sucedido.

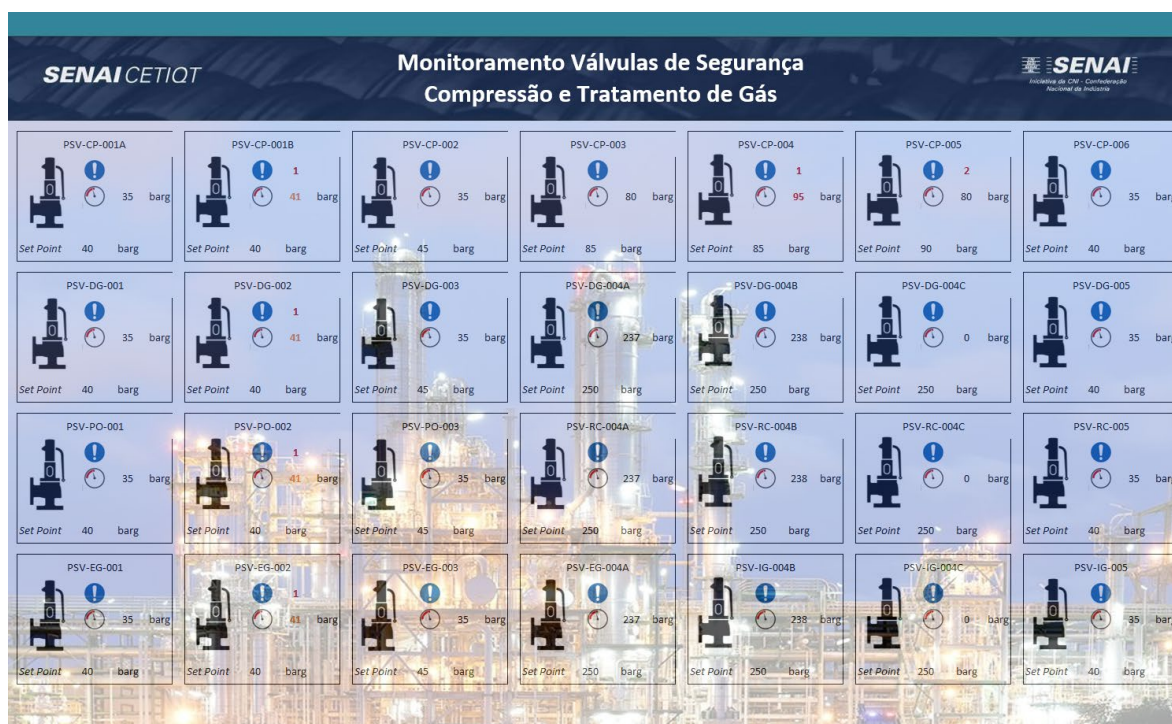
Uma vez que haja acesso aos dados da instrumentação das plataformas, é possível analisá-los basicamente de duas formas:

1. Analisando os dados em tempo real, visando identificar o momento de falha de uma PSV;
2. Realizar estudos nos quais são coletados dados referentes a um determinado período e tentar identificar padrões de falha retroativamente.

A vantagem de utilizar o primeiro modelo é, naturalmente, garantir o menor tempo decorrente entre a identificação da falha e a atuação da operação para saná-la. Por outro, não se deve descartar os estudos retroativos, pois estes permitem analisar padrões cíclicos de falha que dificilmente serão identificados no monitoramento em tempo real.

Usualmente um FPSO possui um número elevado de válvulas de segurança possíveis de serem monitoradas, o que implica em grande volume de dados. Para garantir a eficiência do monitoramento, é recomendável construir uma ferramenta que organize os dados e facilite a análise do monitorador responsável. Uma das possíveis ferramentas para cumprir tal papel é a construção de um *dashboard*, através do qual os dados sejam organizados de uma maneira mais visual para acompanhamento em tempo real. A Figura 5 traz um exemplo de *dashboard* que pode ser utilizado para o monitoramento de PSVs.

Figura 5 - Exemplo de *Dashboard* para Monitoramento de PSVs



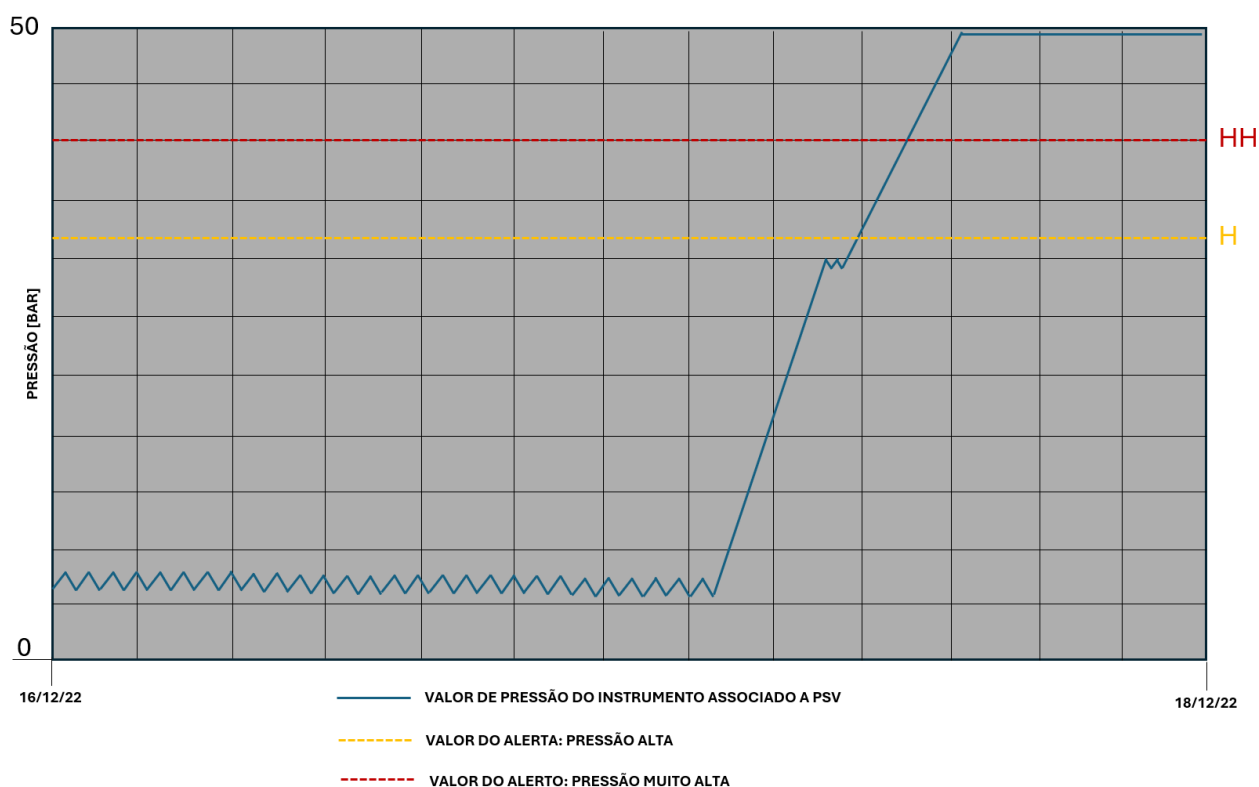
Fonte: Elaboração própria, 2024

Para construção do *dashboard* podem ser utilizadas ferramentas usuais de extração de dados em tempo real, disponíveis no mercado, tais como AVEVA™ PI Vision™ e Grafana, além de ferramentas de visualização de dados como Power BI, Spotfire ou Microsoft Excel.

Outra implementação importante no monitoramento em tempo real é a configuração de alertas. Os alertas são lógicas construídas e implementadas em *dashboards*, como exemplo a Figura 5, que registram e guardam (historicamente) comportamentos anômalos que requerem a atenção do monitorador, otimizando assim o processo de monitoramento.

Outro exemplo de implementação seria a utilização de *trends* (gráficos de tendência), construídos nas ferramentas usuais de avaliação de dados reais onde, diversos alertas podem ser implementados para tornar cada vez mais eficiente este processo. Na Figura 6, é exemplificado um gráfico de tendência, onde é possível acompanhar em tempo real o perfil de pressão do instrumento que foi associado a PSV e visualizar quando o valor supera os alertas configurados.

Figura 6 - Exemplo de *trend* (gráfico de tendência) para Monitoramento de PSVs



Fonte: Elaboração própria, 2024

Em relação a configuração dos alertas, os mais recomendáveis são:

- Alerta de Pressão Alta: este alerta deve ser registrado toda vez que o valor de pressão medida do instrumento de pressão associado a válvula de segurança ultrapassar a pressão do seu set de abertura.
- Alerta de Pressão muito Alta: este alerta deve ser registrado quando o valor de pressão medida do instrumento de pressão associado a válvula de segurança ultrapassar a pressão máxima de trabalho da válvula, levando em conta seu cenário dimensionante.

A partir do momento que são gerados alertas para as válvulas de segurança é necessário que haja uma análise aprofundada do monitorador ou técnico responsável, para identificar padrões que podem indicar qual é o modo de falha da válvula. Para aprofundar esta análise, podem ser utilizados outros instrumentos deste sistema que auxiliem no entendimento do cenário de falha.

Uma vez finalizada a análise do monitorador, suas conclusões podem ser agrupadas em três possíveis cenários, que serão descritos a seguir:

1. Há uma falha na válvula de segurança que deverá ser corrigida pela equipe de manutenção, visando garantir a integridade e o pleno funcionamento da PSV;
2. Existem desvios operacionais no processo do sistema que estão submetendo a válvulas de segurança a constantes acionamentos e devem ser corrigidos;
3. O evento não representa uma falha real e não são necessárias intervenções na válvula ou no processo;

A partir dos três cenários apresentados, são dados diferentes tratamentos para corrigir suas determinadas falhas, sempre envolvendo as disciplinas de engenharia e de manutenção de acordo com a característica do alerta gerado. A Figura 7 ilustra o fluxo do processo de monitoramento descrito anteriormente

Figura 7 - Fluxo do Monitoramento de PSVs de uma Petrolífera Offshore



Fonte: Elaboração própria, 2024

O fluxo de processo do monitoramento apresentado nesta seção é baseado no fluxo de informação de uma empresa exploradora de petróleo offshore. Naturalmente, os fluxos devem sempre levar em conta as características da empresa na qual este será implementado e deve objetivar sempre a eficiência no fluxo de informação, otimizando o processo de monitoramento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados casos reais de uma empresa exploradora de petróleo offshore, na qual o monitoramento de válvulas de segurança foi implementado, seguindo a metodologia apresentada anteriormente.

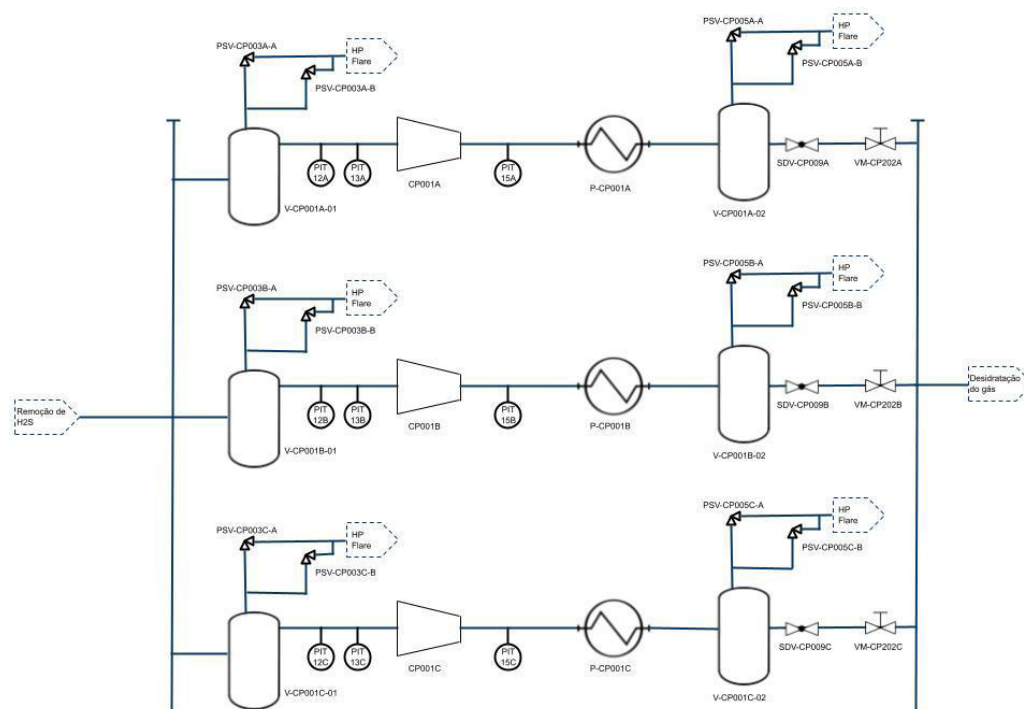
Estes casos mostram como o monitoramento de PSVs atuou identificando falhas operacionais e nas válvulas e posteriormente corrigindo-as.

3.1. Caso 1 – Travamento da válvula de segurança da Compressão Principal de Gás

3.1.1. Descrição do Sistema

Em uma plataforma de exploração offshore, as plantas de compressão de gás visam aumentar a pressão do gás e plantas de tratamento de gás visam o enquadramento dos principais contaminantes do hidrocarboneto exportado, que são o H₂S (Sulfeto de Hidrogênio, Ácido Sulfídrico), H₂O (água) e CO₂ (Dióxido de Carbono). Especificamente para a plataforma analisada neste caso, entre o módulo de Remoção de H₂S (H₂SRU) e o módulo de Desidratação do Gás (GDU), há um módulo de compressão de gás, denominada Compressão Principal (CP). A Figura 8 abaixo mostra o esquema simplificado do sistema da Compressão Principal.

Figura 8 - Fluxograma da Compressão Principal de um FPSO



Fonte: Elaboração própria, 2024

A Compressão principal dispõe de 3 compressores em paralelo (CP001A / CP001B/ CP001C), que elevam a pressão do gás de aproximadamente 1600 kPag para 8000 kPag em apenas 1 estágio.

Cada compressor possui um vaso *scrubber* na sucção (V-CP-001A-01 / V-CP-001B-01 / V-CP-001C-01), um trocador de calor com água de resfriamento na descarga (P-CP-001A / P-CP-001B / P-CP-001C) e um vaso *scrubber* (V-CP-001A-02 / V-CP-001B-02 / V-CP-001C-02) à jusante do trocador de calor.

O vaso *scrubber* da sucção possui duas válvulas de segurança (PSVs) instaladas no topo. Uma (1) válvula está em operação e a outra fica como reserva.

A função das PSVs é evitar sobrepressões acima da PMTA (Pressão Máxima de Trabalho Admissível) do vaso (4765 kPag). Nesse caso, as PSVs foram calibradas com o set em 4747 kPag. A identificação dessas válvulas são:

- PSV-CP-003A-A e PSV-CP-003A-B, referentes ao vaso *scrubber*, V-CP-001A-01;
- PSV-CP-003B-A e PSV-CP-003B-B, referentes ao vaso *scrubber*, V-CP-001B-01;
- PSV-CP-003C-A e PSV-CP-003C-B, referentes ao vaso *scrubber*, V-CP-001C-01;

Tabela 2 – Informações técnicas das válvulas de segurança dos vasos *scrubber* de sucção

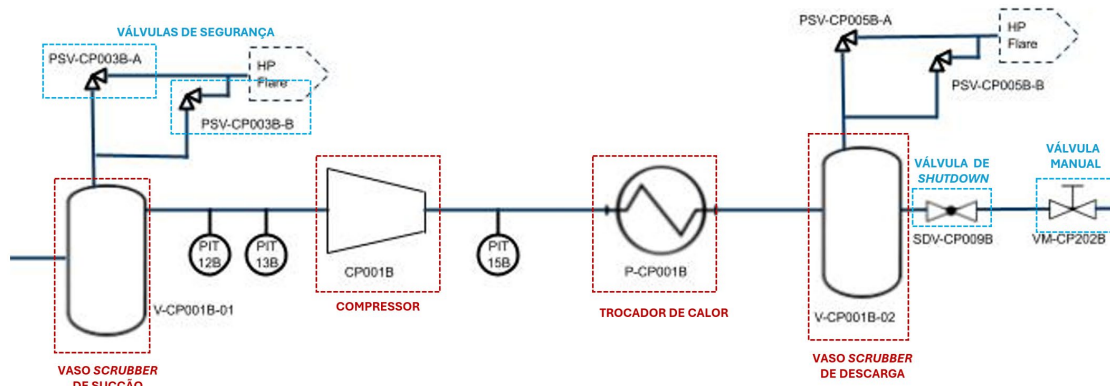
PSV	
Fluido	Hidrocarboneto
Estado	Gasoso
Capacidade Requerida (kg/h)	4078
Peso Molecular	24,9
Pressão de Operação (kPag)	4129
Set de Pressão (kPag)	4747

Fonte: Elaboração própria, 2024

Além disso, os compressores possuem uma válvula de *shutdown* (válvula de desligamento) (SDV-CP-009A, SDV-CP-009B e SDV-CP-009C) à jusante do vaso *scrubber* de descarga, que fecha automaticamente em casos de intertravamento da máquina, shutdown da plataforma ou falha de modo comum. Por fim, ainda há uma válvula manual próxima ao header de descarga dos compressores, que opera normalmente

aberta, mesmo se a máquina estiver desalinhada. Sendo assim a configuração segue a Figura 9.

Figura 9 – Configuração de um segmento da planta de compressão principal (CP)



Fonte: Elaboração própria, 2024

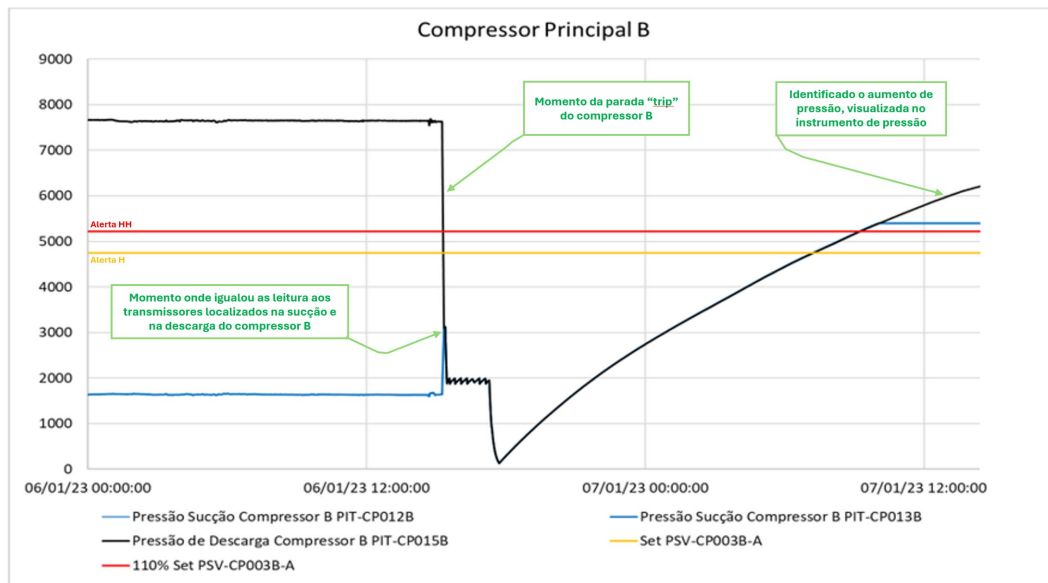
3.1.2. Descrição do Evento

Conforme o gráfico da Figura 10, foi identificado pelo monitorador um aumento de pressão gradativo após o *trip* do compressor B (CP-001B). O tal aumento de pressão foi visualizado nos instrumentos de pressão PIT-CP-012B e PIT-CP-013B localizando na sucção do compressor principal B, onde ultrapassaram 110% do set de pressão das PSVs, ou seja, a pressão chegou acima da faixa de 5221,7 kPag.

Após o *trip* do compressor B, o PIT-CP-015B, instalado na descarga do compressor, igualou sua leitura aos transmissores de entrada (PIT-CP-012B e PIT-CP-013B), o que é esperado após o desligamento da máquina.

Porém, foi observado um aumento gradativo da pressão ao longo do dia (indicado pela linha na cor preto na Figura 10), e tendendo para a pressão do header de descarga dos compressores principais, evidencia que havia uma passagem pela válvula de shutdown (SDV-CP-009B) de descarga do Compressor B (CP-001B), além de indicar que a válvula de segurança PSV instalada no vaso *scrubber* de sucção (V-CP-001B-01) não estava abrindo no seu set.

Figura 10 – Gráfico de Tendência das Pressões do sistema



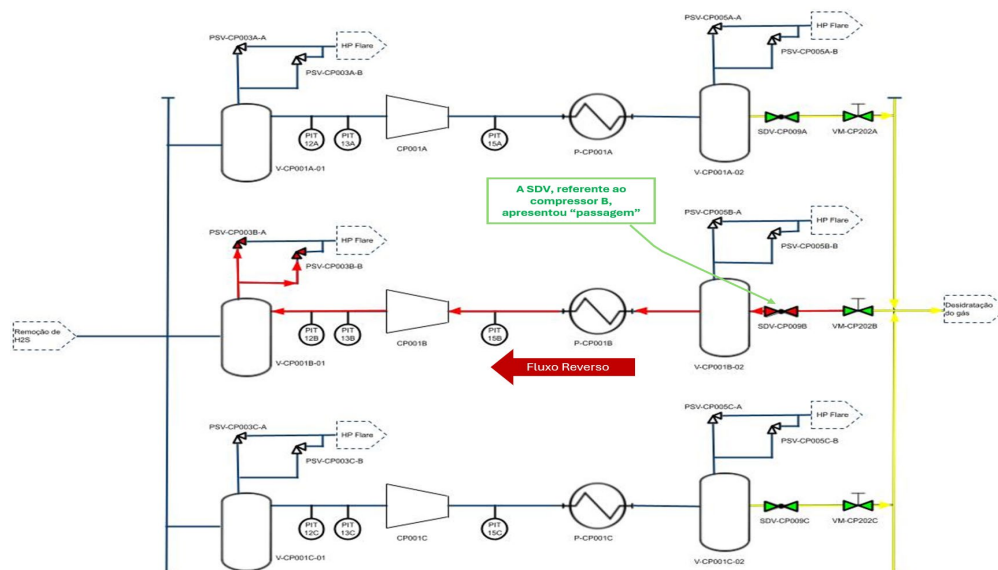
Fonte: Elaboração própria, 2024

3.1.3. Investigação da causa do evento

Durante a operação normal estavam operando os compressores A e C, com a válvula de *shutdown* SDV-CP-009B do compressor B fechada e a com a válvula manual VM-CP-202B aberta.

Foi identificado que a SDV-CP-009B que estava fechada apresentou passagem, gerando um fluxo reverso que levou a pressurização de todo o sistema a montante desta válvula, conforme indicado na Figura 11.

Figura 11 - Trend das Pressões do Caso 1



Fonte: Elaboração própria, 2024

3.1.4. Atuação do monitorador

Frente ao cenário analisado, o monitorador recomendou as seguintes ações imediatas:

- Fechamento da válvula manual do segmento onde o compressor B está instalado. Com objetivo de isolar a válvula de shutdown a montante e evitar que o contrafluxo continue para o compressor;
- Despressurização do sistema de compressão isolado;

Além disso, solicitou a abertura de um estudo multidisciplinar para averiguar as falhas nas barreiras de segurança do Compressor Principal B, pois a pressão do sistema pode ter chegado a 31% da PMTA do vaso (V-CP-001B-01).

No estudo multidisciplinar, foram levantadas (2) duas ações para o evento:

1. Troca da SDV-CP-009B, visto que já havia a bordo a válvula e havia facilidade para sua substituição;
2. Retirada da PSV-CP-003B-A para verificação de sua integridade e calibração em bancada.

3.2. Caso 2 – Válvula de Segurança atuando com frequência devido a desvio operacional

3.2.1. Descrição do Sistema

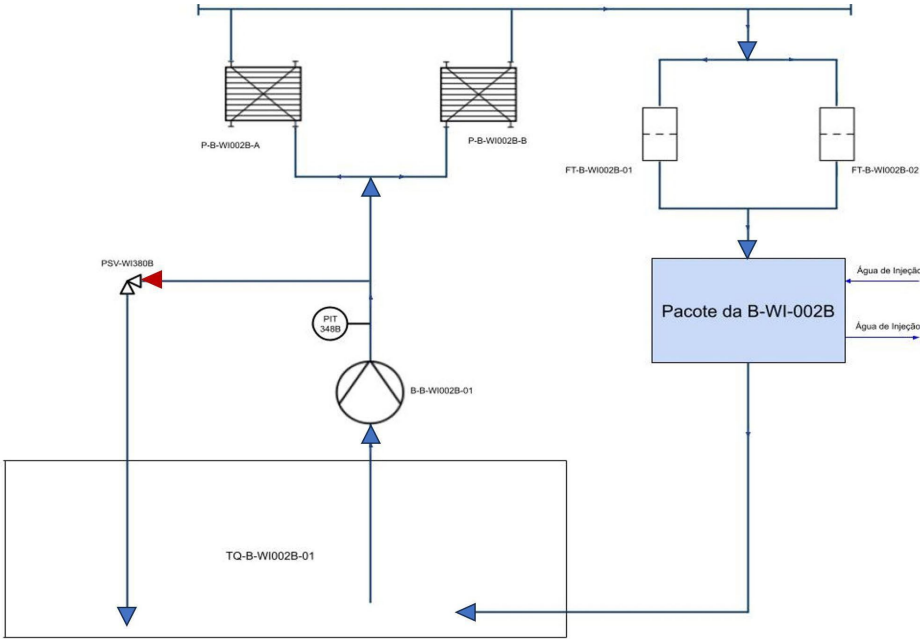
Em uma plataforma de exploração offshore, existe um sistema para tratamento da água de injeção, utilizado para enquadrar o fluido injetado nas especificações que a equipe de Engenharia de Reservatórios demanda para a operação. No final do tratamento, há uma bomba que dá a pressão necessária à água para a mesma escoar até o poço e ser injetada no reservatório.

O sistema de injeção da plataforma em questão, possui (2) duas bombas de injeção de água (B-WI-002A e B-WI-002B). Os dois equipamentos possuem sistemas de lubrificação independentes. Esse sistema é um processo auxiliar que tem como objetivo reduzir o atrito entre as partes móveis da bomba centrífuga, minimizando o desgaste e dissipando o calor gerado durante a operação

O sistema dispõe de uma bomba de lubrificação (B-B-WI-002X-01), (1) uma PSV (PSV-WI-380X) na descarga da bomba para evitar sobrepressão na linha, (2) dois

permutadores de placa (P-B-WI-002X-A e P-B-WI002X-B), que resfriam o óleo lubrificante, (2) dois filtros (FT-B-WI-002X-01 e FT-B-WI-002X-02) para retirar as impurezas carregadas pelo fluido e (1) um tanque de armazenamento do óleo (TQ-B-WI-002X-01), conforme Figura 12.

Figura 12 - Diagrama simplificado do sistema de lubrificação de bomba de injeção de água B



Fonte: Elaboração própria, 2024

O sistema de lubrificação é fechado, ou seja, é esperado que todo fluido bombeado pela bomba de lubrificação (B-B-WI-002B-01) retorne para o tanque de armazenamento após realizar a lubrificação nas bombas de injeção de água (B-WI-002B).

A PSV-WI-380B instalada na descarga da bomba direciona o óleo lubrificante de volta para o tanque de armazenamento quando a pressão na linha atinge o seu set de 1000 kPag. O instrumento de pressão, transmissor PIT-WI-348B é utilizado tanto para verificar a pressão aplicada na PSV, quanto para o intertravamento da bomba de lubrificação.

Tabela 3 – Informações técnicas das válvulas de segurança

PSV-WI-380B	
Fluido	Óleo Lubrificante
Estado	Líquido
Pressão de Operação (kPag)	550
Set de Pressão (kPag)	1000

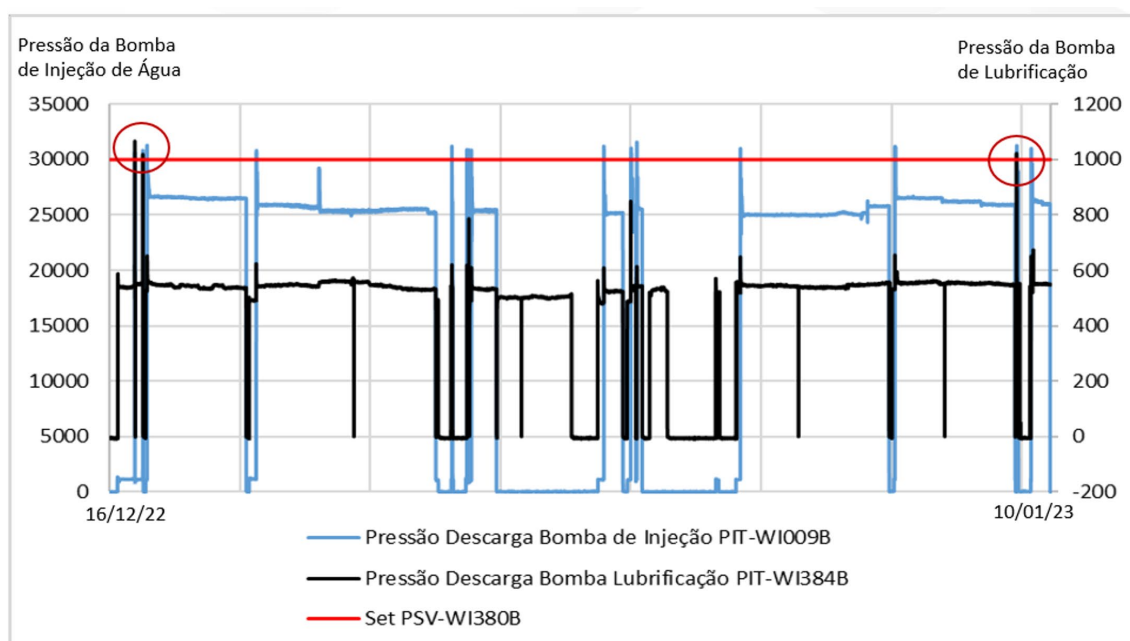
Fonte: Elaboração própria, 2024

3.2.2. Descrição do Evento

O monitorador identificou que ocorreram três (3) alertas H no período de um mês, destacados em vermelho na Figura 13.

Ao analisar o gráfico de tendência do período que relaciona a pressão do transmissor de pressão PIT-WI384B (associado a PSV-WI380B) com pressão de descarga da bomba B-WI-002B (PIT-WI009B), foi possível observar que o aumento de pressão está relacionado com momentos de repartida da bomba de injeção B, onde há picos de pressão por conta do procedimento de retorno da bomba.

Figura 13 – Gráfico de Tendência de Pressão do Sistema de Lubrificação



Fonte: Elaboração própria, 2024

Devido à pressão da linha estar passando do set da PSV, e retornando ao patamar normal de operação, é possível constatar que a válvula está abrindo no seu set corretamente. Porém, a válvula não foi dimensionada para abrir tantas vezes em tão pouco tempo. Esse cenário é favorável para uma eventual perda de vedação por danos ao bocal e disco da PSV, podendo acarretar uma parada da máquina, visto que não há redundância para essa válvula.

3.2.3. Investigação da causa do evento

Apesar de não ter sido confirmada a causa raiz do problema, as possíveis hipóteses estão sendo avaliadas:

- Saturação dos filtros;
- Aumento de perda de carga nos permutadores;
- Baixa qualidade do óleo utilizado;
- Erros no procedimento de repartida da bomba de injeção de água;
- Dimensionamento incorreto da PSV.

3.2.4. Atuação do monitorador

Após a análise, o monitorador recomendou as seguintes ações:

1. Retirada da PSV-WI-380B para inspeção e calibração em bancada por oportunidade;
2. Avaliar se há algum bloqueio no trecho entre a descarga da bomba e os permutadores, visto que o evento de sobrepressão durante as repartidas estão muito frequentes.

3.3. Indicadores de performance do monitoramento das válvulas de segurança

É possível acompanhar os resultados do monitoramento das válvulas de segurança através da implementação de KPIs (*Key Performance Indicators*), indicadores-chave de desempenho que ajudam as organizações a medir e avaliar o progresso em relação a metas e objetivos.

1. Razão de PSVs contempladas no monitoramento. O indicador pode ser calculado através da razão entre o número de válvulas existentes no FPSO e o número de válvulas monitoradas em determinado momento. O indicador auxilia na visibilidade da abrangência do monitoramento realizado, permite identificar o impacto de falhas nos sistemas de instrumentação da unidade no monitoramento, além de fornecer um parâmetro de evolução em caso de investimentos adicionais em instrumentação, visando a expansão do monitoramento.
2. Número de alertas gerados. Após a implementação dos alertas para as válvulas, é possível calcular uma taxa de alertas gerados por PSVs monitoradas. Esse número representa a quantidade de falhas em válvulas de segurança ocorridas e seu acompanhamento periódico permite inferir se há melhora na integridade das PSVs do FPSO.

3. Tempo médio entre alertas para cada PSV. Esse indicador auxilia na identificação de válvulas que estariam mais suscetíveis a uma determinada falha. Além disso, a evolução desse indicador pode auxiliar medir a eficiência das manutenções realizadas nas válvulas de segurança.

4. CONCLUSÕES

Conforme demonstrado neste trabalho, é possível implementar um eficiente sistema de monitoramento de válvulas de segurança (PSVs) por meio da utilização da instrumentação presente em FPSOs, em particular os transmissores de pressão já existentes. Através dessa abordagem, é possível obter dados em tempo real sobre a pressão de operação das PSVs, permitindo um acompanhamento contínuo e mais preciso do funcionamento desses dispositivos cruciais para a segurança das unidades. Essa estratégia de monitoramento baseada na instrumentação existente representa uma alternativa viável e de baixo custo para garantir a integridade e confiabilidade das PSVs, contribuindo para a segurança operacional das operações offshore.

Os casos apresentados no trabalho demonstraram de forma clara a efetividade do monitoramento de válvulas de segurança (PSVs) e os resultados positivos obtidos em termos de segurança de processos. Ao implementar sistemas de monitoramento, foi possível detectar de forma antecipada e precisa possíveis falhas ou desvios de operação das PSVs, permitindo ações corretivas imediatas. Isso resultou em uma redução significativa dos riscos de acidentes ou vazamentos, garantindo a proteção dos equipamentos, dos trabalhadores e do meio ambiente. Além disso, o monitoramento contínuo das PSVs proporcionou uma melhor compreensão do comportamento desses dispositivos, auxiliando no planejamento de manutenções preventivas e aumentando a confiabilidade operacional das unidades. Os resultados alcançados reforçam a importância do monitoramento de PSVs como uma ferramenta eficaz na gestão da segurança e no controle de processos industriais.

Em suma, a metodologia proposta neste trabalho de monitoramento de válvulas de segurança (PSVs) utilizando a instrumentação existente em FPSOs demonstrou não apenas sua efetividade, mas também sua viabilidade para ser replicada em diversas unidades offshore. A abordagem baseada nos transmissores de pressão já instalados dispensa grandes adaptações ou investimentos significativos, tornando-a uma solução atrativa do ponto de vista econômico. Dessa forma, outras unidades operacionais podem

adotar facilmente essa metodologia, aproveitando a infraestrutura existente e obtendo os mesmos benefícios em termos de segurança de processos. A implementação generalizada desse sistema de monitoramento contribuirá para elevar os padrões de segurança em toda a indústria offshore, garantindo a proteção das pessoas, do meio ambiente e dos ativos envolvidos nas operações, além de aumentar a eficiência operacional nas unidades de processamento.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries: Part I – Sizing and Selection*. API recommended practice 520. 7th ed. American Petroleum Institute, 2000.

BEGA, E. A. (Org.). *Instrumentação industrial*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência/IBP, 2006.

BRASIL, N. I.; ARAÚJO, M. A. S.; SOUSA, E. C. M. (Org.). *Processamento de petróleo e gás: petróleo e seus derivados, processamento primário, processos de refino, petroquímicas, meio ambiente*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CENTRO PARA SEGURANÇA DE PROCESSOS QUÍMICOS (CCPS); INSTITUTO AMERICANO DE ENGENHEIROS QUÍMICOS (AIChE). *Diretrizes para segurança de processo baseada em risco*. Tradução Petrobras/Recursos Humanos/Universidade Petrobras. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

CHEDDIE, H. A.; GRUHN, P. *Safety Instrumented Systems: Design, Analysis and justification*. 2 ed. Research Triangle Park: ISA, 2006.

HELLEMANS, M. *The safety relief valve handbook: design and use of process safety valves to ASME and international codes and standards*. Oxford: Butterworth -Heinemann, 2009.

OKOH, P.; HAUGEN, S.; VINNEM, J. E. Optimization of recertification intervals for PSV based on major accident risk. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 2016, pp. 150-157.