

Uso de Simulação de Processos para Identificação e Análise de Desvios de Processos

Rafael Raoni^{a,b}, Argimiro R. Secchi^a,

^a Programa de Engenharia Química-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, 21941-914 Rio de Janeiro-RJ, Brasil

Micaela Demichela^b

^b Department of Applied Science and Technology, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italia

RESUMO: Neste trabalho é proposto um novo método de análise de riscos para identificação desvios de processos que: (i) melhor interpreta o comportamento anormal do processo, (ii) usa simulação de processos para identificação dos desvios de processo; e (iii) conclui o estudo a partir de uma reunião de especialistas que usam seus conhecimentos empíricos para a avaliação dos cenários identificados pela etapa de simulação. Com o uso da metodologia é possível melhor entender a dinâmica e não linearidade do processo analisado e obter resultados quantitativos dos desvios. A quantificação prévia dos desvios possibilita melhores conclusões durante a análise empírica do estudo, reduzir o tempo de reunião e melhorar os resultados finais. Dois estudos de caso são apresentados, sendo um composto por um sistema de partida de bombas, em que o processo é analisado via HAZOP e via metodologia proposta e as vantagens na melhor interpretação do processo e nos resultados obtidos são apresentadas. No segundo estudo de caso, um sistema de separação primária de uma plataforma *offshore* é analisado a fim de exemplificar como um comportamento anormal do processo pode ser analisado de forma dinâmica.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Atualmente, diferentes técnicas de análise de riscos são aplicadas na indústria. Normalmente, tais técnicas apresentam metodologias bem definidas que são aplicadas por um grupo multidisciplinar de especialistas [1, 2]. Para perigos de processos industriais, o estudo de HAZOP (*hazard operability*) [3-6] é um dos mais aplicados [6]. Idealizado para processos contínuos, a principal aplicação da metodologia está na identificação dos perigos em indústrias que lidam com materiais perigosos, buscando eliminar as fontes de grandes acidentes [7], entretanto a melhor compreensão da operação do sistema também tem sua grande importância no estudo [3]. O estudo de HAZOP é demandado em vários programas de gerenciamento de riscos, em que os cenários indesejados são identificados a fim de possibilitar uma posterior análise quantitativa de risco. Entretanto, para o gerenciamento de risco de uma indústria química, normalmente são solicitadas apenas análises qualitativas de risco, fazendo com que toda sua segurança dependa da eficiência e qualidade de tais estudos [8].

Dada a importância em identificar e analisar perigos industriais, é esperado a necessidade contínua de técnicas aprimoradas. Neste sentido, técnicas que utilizam ferramentas computacionais são amplamente estudadas para melhorar a eficiência de tais estudos, como os estudos de *expert systems* aplicados em análises de HAZOP [7]. Ademais, a aplicação de simulação dinâmica para segurança também é bastante estudada [9-11]. Especificamente para análise de riscos, estudos que apresentam um HAZOP estendido baseado em simulação dinâmica [12] e uso de simulação dinâmica em análises de desvios em processos não lineares [13-14] destacam a importância da simulação para estudos de desvios de processos.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um novo método de análise de riscos para identificação desvios de processos. O método proposto identifica a falha de um dispositivo como o cenário de risco a ser analisado, faz uso de simulação de processos para identificação de todos os desvios de processos dependentes das falhas dos dispositivos e é concluído com uma análise empírica dos resultados gerados pelas simulações.

2. DESCRIÇÃO DO TRABALHO REALIZADO

2.1. Método Proposto

O método proposto é baseado na melhor interpretação das causas e consequências do sistema. Identificando que qualquer desvio de processo é causado por uma modificação anterior em um de seus dispositivos, o método foi desenvolvido a partir da interpretação do processo conforme apresentado na Figura 1.

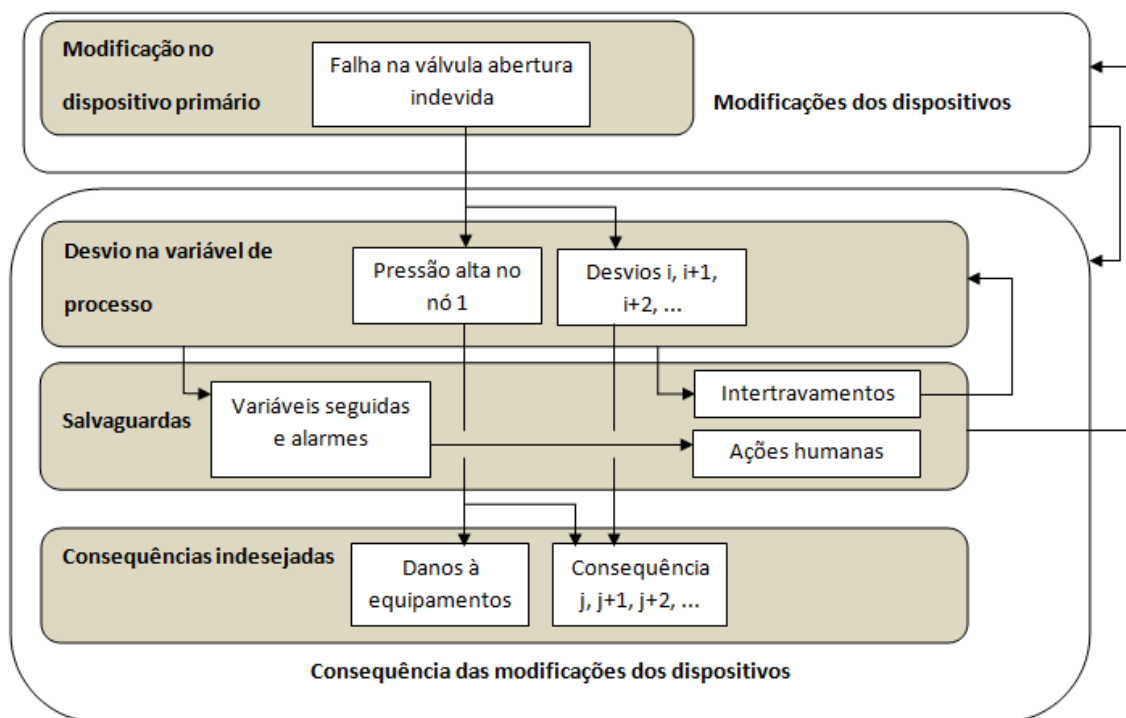


Figura 1: Interpretação do processo utilizado.

As principais características do método são:

- Início da análise com a identificação das falhas dos dispositivos, que identificarão os cenários analisados.
- Simulação fenomenológica dos desvios a fim de se identificar os desvios de processos relacionados às falhas dos dispositivos
- Uso dos resultados das simulações como input para a análise empírica de risco, que identifica e analisa as consequências dos desvios de processo identificados

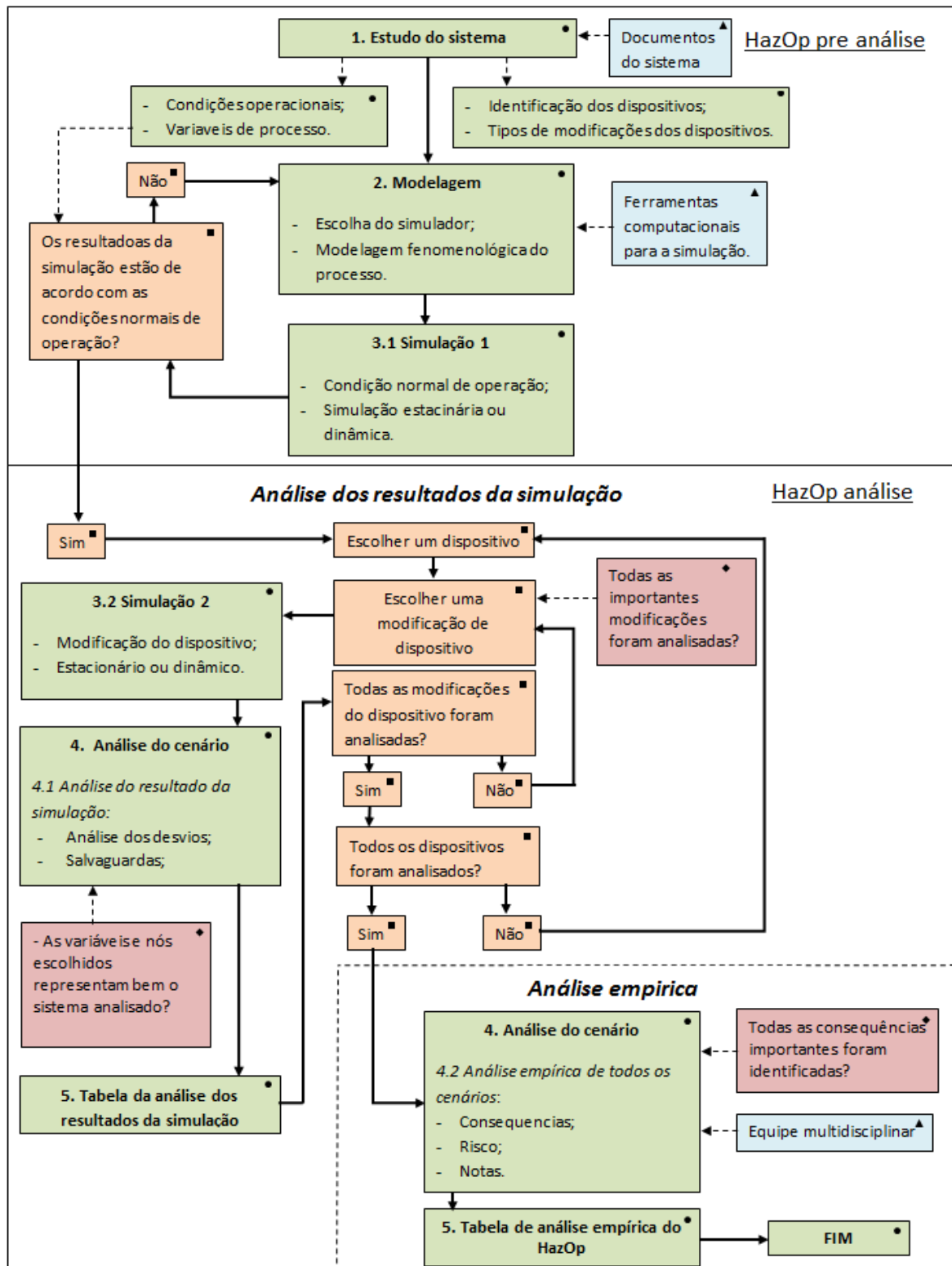
A fim de serem aproveitadas ao máximo as informações disponibilizadas nas simulações e melhor representar o sistema descrito, os resultados do estudo são apresentados em uma tabela, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Tabela da análise de risco proposta

Sistema estudado:						
Dispositivo modificado:						
Número do cenário:						
Modificação do dispositivo	<i>Análise dos resultados da simulação</i>					
	Informações dos desvios		Salvaguardas dos desvios			
	Valor normal da variável	Valor em desvio	Variável seguida	Alarmes	Intertravamentos	Possibilidade de ações humanas?
	<i>Análise empírica</i>					
	Consequências futuras	Salvaguardas das consequências	Análise do Risco:			Notas, Observações e Recomendações
			Frequência	Severidade	Risco	

A partir desta descrição, é importante destacar a separação do estudo em duas partes: “Análise dos resultados da simulação”, em que todas as informações importantes do processo, que podem ser obtidas a partir dos resultados das simulações, são listadas; e “Análise empírica”, em que é realizada a identificação das consequências indesejadas causadas pela modificação dos dispositivos e também as necessárias avaliações de risco para as consequências identificadas.

Na Figura 2 é apresentada a sequência de procedimentos a serem seguidos no método proposto.



Legenda

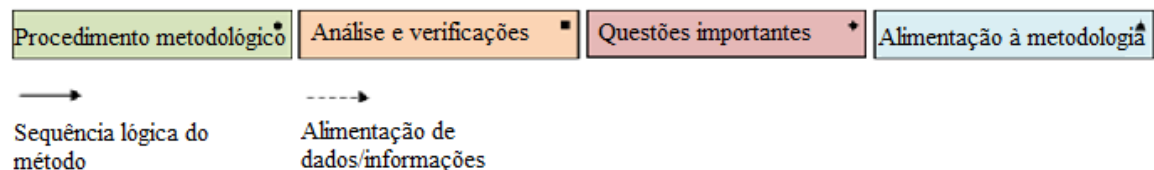


Figura 2: Sequência de procedimentos do método proposto.

3. RESULTADOS OBTIDOS

3.1. Sistema de Partida de Bombas

3.1.1. Descrição

O sistema de partida de bombas é um sistema encontrado em instalações com bombas de grande capacidade (alta vazão e pressão de descarga). O sistema consiste em um arranjo de tubulações que conectam a descarga da bomba com sua sucção, permitindo a recirculação do fluido, e acidentes de tubulação necessários para a estabilização da pressão da descarga da bomba com sua sucção. O sistema é utilizado na partida da bomba a fim de minimizar a potência requerida, evitando assim danos elétricos que podem causar incêndio ou outras consequências indesejadas. O sistema analisado é apresentado na Figura 3, os dados utilizados para a simulação são apresentados na Tabela 2 e os intertravamentos e alarmes do sistema na Tabela 3.

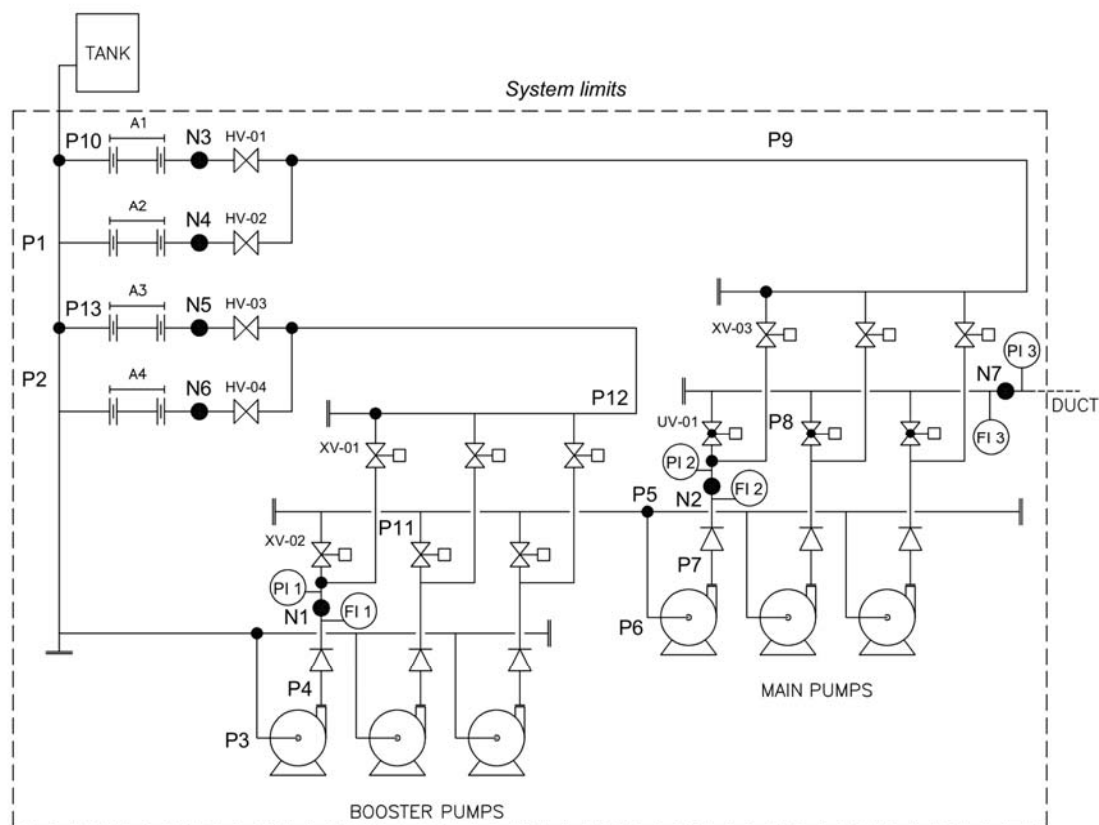


Figura 3: Sistema de partida de bombas.

Tabela 2: Especificações da simulação.

P_0 (coluna de petróleo)	110.2 kPa
Equação de perda de carga	Darcy-Weisbach
Rugosidade	4.572×10^{-5} m
Comprimento reto dos tubos (para os 13 tubos)	[20 30 10 10 70 16.5 6 15.9 80 10 10 20 10] m
Diâmetro dos tubos (para os 13 tubos)	[1.40 1.407 0.74 0.58 1.04 0.58 0.48 0.23 0.58 0.23 0.18 0.38 0.18] m
Densidade	937 kg/m ³
Viscosidade	206.14 cP
Curva da bomba principal (F [=] m ³ /h)	$(-1.8 \times 10^{-8} F^3 + 1.8 \times 10^{-4} F^2 - 0.28 F + 8456.53)$ kPa
Curva da bomba <i>booster</i> (F [=] m ³ /h)	$(2.8 \times 10^{-8} F^3 - 8.3 \times 10^{-5} F^2 + 0.051 F + 1303.1)$ kPa
Vazão mínima da bomba principal	$F_{\text{bomba.principal}} > 720$ m ³ /h (0.20 m ³ /s)
Vazão mínima da bomba <i>booster</i>	$F_{\text{bomba.booster}} > 320$ m ³ /h (0.09 m ³ /s)
Diâmetro do orifício da bomba principal	2.6 in (0.0660 m)
Diâmetro do orifício da bomba <i>booster</i>	2.8 in (0.0711 m)

Desvio de processo	Causas	Consequências	Salvaguardas	Danos à instalação			Notas, observações e recomendações
				Freq.	Sev.	Risco	
Baixa pressão	1-HV-01 Aberta	*Dano à bomba; *Baixa vazão (causa 3, 4 e 5) *Vazão alta (causas 1 e 2)	*FSL2 (desliga a bomba principal por vazão baixa)	5	3	Marginal	É possível prever intertravamento de baixa pressão, mas são necessárias mais informações para ajuste do set point do instrumento.
	2-UV-01 Aberta						
	3-XV-02 Fechada						
	4-Parada da bomba <i>booster</i>						
	5- Parada da bomba principal						

3.1.3. Aplicação do estudo de risco proposto

Após a identificação dos dispositivos do Sistema e suas possíveis falhas, apresentadas na Tabela 7, os passos da Figura 2 foram aplicados.

Tabela 7: Falhas nos dispositivos analisadas.

Dispositivos*	Falha	Número do cenário
XV-01	Fechamento da válvula	1
XV-02	Fechamento da válvula	2
XV-03 ou HV-01**	Fechamento da válvula	3
HV-02	Fechamento da válvula	4
UV-01	Abertura indevida	5
Bomba principal	Parada	6
Bomba <i>booster</i>	Parada	7

*As falha das HV-03 e HV-04 foram desconsideradas, pois estas seriam identificadas na partida da bomba *booster*, etapa anterior à partida da bomba principal.

**falhas com os mesmos desvios

Todas as falhas foram simuladas a fim de identificar seus desvios de processo dependentes e execução da análise empírica. Os resultados do cenário 4 são apresentados na Tabela 8 e suas notas e recomendações na Tabela 9.

Tabela 8: Resultados do cenário 4.

Sistema: Sistema de partida de bombas						
Dispositivo: HV-02						
Cenário: 4						
Falha do dispositivo	Análise dos resultados da simulação					
	Informação dos desvios		Salvaguardas dos desvios			
	Valor normal da variável	Valor em desvio	Variável seguida	Alarme	Intertravamento	Possibilidade de ação humana?
Abertura	P _{N1} : 13.9x10 ⁵ Pa	13.1x10 ⁵ Pa	Sim	Não	Não	Sim: Via análise das variáveis de processo seguidas PI1, FI1, PI2 e FI2.
	F _{N1} : 0.31 m ³ /s	0.50 m ³ /s	Sim	Não	Não	
	P _{N2} : 96.5x10 ⁵ Pa	90.1x10 ⁵ Pa	Sim	Não	Não	
	F _{N2} : 0.21 m ³ /s	0.40 m ³ /s	Sim	Não	Não	
	F _{N3} : 0.21 m ³ /s	0.20 m ³ /s	Não	Não	Não	
	F _{N4} : 0 m ³ /s	0.20 m ³ /s	Não	Não	Não	
	F _{N5} : 0.10 m ³ /s	0.097 m ³ /s	Não	Não	Não	
	F _{N6} : 0 m ³ /s	0 m ³ /s	Não	Não	Não	
	F _{N7} : 0 m ³ /s	0 m ³ /s	Sim	Não	Não	
	Análise empírica					
	Consequências futuras	Salvaguarda das consequências	Análise de risco: Integridade de ativos			Notas, observações e recomendações
			Frequência	Severidade	Risco	
	Alta potência – Dano à bomba principal	Sem salvaguarda	5	3	Marginal	Recomendação 1
	Foco de incêndio	Sistema de combate a incêndio	3	4	Marginal	Nota 1

Tabela 9: Nota e recomendação.

Nota 1

Como o “foco de incêndio” é uma consequência future da “alta potência”, e não necessariamente “alta potência” leva à “foco de incêndio”, a frequência de “incêndio é menor do que a frequência de “alta potência”.

Recomendação 1

Dado risco marginal, é necessária previsão de uma salvaguarda para o Sistema, podendo ser intertravamentos ou alarmes para as variáveis acompanhadas (FI1, PI1, FI2, PI2).

3.1.4. Comparação do estudo de HAZOP com o método proposto

Os resultados da Tabela 6 mostram que “pressão baixa” no N2 é uma consequência de várias causas, incluindo a abertura da HV-02, analisada pela metodologia proposta (Tabela 8). Entretanto, nem todas as causas que levam a “pressão baixa” no N2 têm as mesmas causas e consequências futuras. Na Tabela 10 são apresentadas as relações entre as causas e consequências futuras dos cenários obtidas pela metodologia proposta que apresentaram “pressão baixa” no N2.

Tabela 10: Causa e consequência futura dos cenários com “pressão baixa” no N2.

Causa	Consequência futura
Abertura da HV-02 e UV-01	*Dano à bomba principal (potência alta); *Foco de incêndio.
Fechamento da XV-02	* Dano à bomba principal (sem vazão na sucção);
Parada da bomba <i>booster</i>	* Dano à bomba principal (vazão menor que a mínima).
Parada da bomba principal	*Sem consequências futuras.

Conforme apresentado na Tabela 10, diferentes causas apresentam diferentes consequências futuras, mesmo tendo o mesmo desvio de variável de processo. Esta conclusão resume uma das dificuldades do estudo de HAZOP em identificar as consequências no processo a partir da análise de um único desvio de processo.

3.2. Separação primária de uma plataforma *offshore*

3.2.1. Descrição

Durante a extração de óleo, uma plataforma *offshore* separa óleo, gás e a água produzida no seu sistema de tratamento primário e controla sua produção via injeção do gás produzido (gás-lift) em seus poços. Um fluxograma simplificado de tal sistema é apresentado na Figura 4.

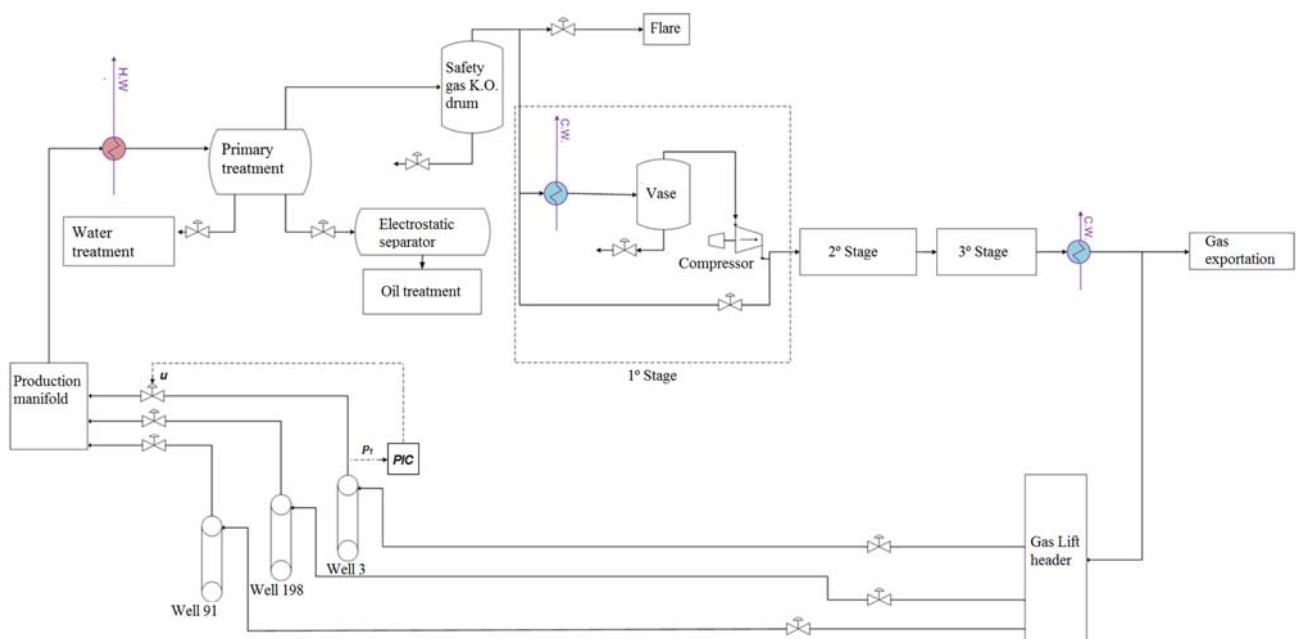


Figura 4: Fluxograma simplificado de um sistema de separação primária em uma planta *offshore*.

Para realizar as simulações necessárias à aplicação da metodologia proposta foi utilizado o modelo fenomenológico do processo desenvolvido no simulador de processos EMSO [15], que contou com a contribuição de diferentes pesquisadores [16, 17]. Em situação de operação normal, a simulação considerou a produção contínua dos três poços e o sistema de controle implementado para controlar a qualidade da do óleo, via BSW (*basic sediments and water*), e água, via TOG (teor de óleo e graxa) produzido. As variáveis acompanhadas para o entendimento do processo são as apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Variáveis de processo acompanhadas.

Variável de processo	Descrição das variáveis
F_{gas}	Produção total de gás
F_{water}	Produção total de água
F_{oil}	Produção total de óleo
P_{header}	Pressão no <i>manifold</i> de produção
TOG	Teor de óleo e graxa na água
BSW	<i>Basic sediments and water</i> no óleo
F_{flaregas}	Alívio total de gás para o <i>flare</i>

3.2.2. Aplicação na análise de risco proposta

Neste exemplo foi estudada a abertura indevida da válvula de *flare*, localizada a jusante do K.O. drum e a montante do sistema de *flare*. A válvula foi projetada para aliviar gás para o *flare* a fim de manter a pressão do sistema menor que 10.1×10^5 Pa (10 atm). Em operação normal, a pressão do sistema é menor que 10 atm e a válvula se mantém fechada. A simulação dinâmica realizada para o cenário investigado considerou operação normal até 1000 segundos, momento em que a válvula de alívio para o *flare* teve uma abertura indevida de 40%. A simulação dinâmica continuou até 3600 segundos a fim de se identificar o comportamento do sistema. O comportamento das variáveis acompanhadas (Tabela 11) é apresentado na Figura 5.

Conforme apresentado na Figura 5, todas as variáveis acompanhadas sofreram desvio dado a simulação da falha no dispositivo, e algumas delas não chegaram a um estado estacionário após 3600 segundos. A análise dinâmica e quantitativa possibilitou identificar que uma grande quantidade de óleo e água fora de especificação é enviada para seus sistemas a jusante. Na Tabela 12 é apresentada a tabela da metodologia proposta com os resultados da simulação para uma amostragem que ocorreu no tempo de 2000 segundos.

Tabela 12: Separação primária – Falha na válvula de *flare*.

Sistema estudado: Separação primária de uma plataforma offshore						
Dispositivo: Válvula de flare						
Modificação do dispositivo	Análise dos resultados da simulação					
	Informação dos desvios		Informação dos desvios			
	Valor normal da variável	Valor normal da variável	Valor normal da variável	Valor normal da variável	Valor normal da variável	Valor normal da variável
Abertura (40%)	Fgas = 1475.68 kmol/h	1517.02 kmol/h	Sim	Não	Não	Sim. As variáveis acompanhadas possibilitam a identificação de um comportamento anormal. Mas o diagnóstico da falha não é facilmente identificado.
	Fwater = 5649.03 kmol/h	5820.40 kmol/h	Sim	Não	Não	
	Foil = 788.12 kmol/h	797.32 kmol/h	Sim	Não	Não	
	Pheader =10.63 atm	8.23 atm	Sim	Não	Não	
	OGC = 0.00151	0.00153	Não	Não	Não	
	BSW = 0.03394	0.03466	Não	Não	Não	
	Fflaregas = 0.0 kmol/h	351.81 kmol/h	Sim	Não	Não	
	Análise empírica					
	Consequências futuras	Salvaguarda das consequências	Análise de risco: Produção			Notas, observações e recomendações
			Frequência	Severidade	Risco	
	Grande produção de óleo e água fora de especificação	Controle avançado	3	4	Marginal	Obs.: Consequências aos sistemas à jusante.

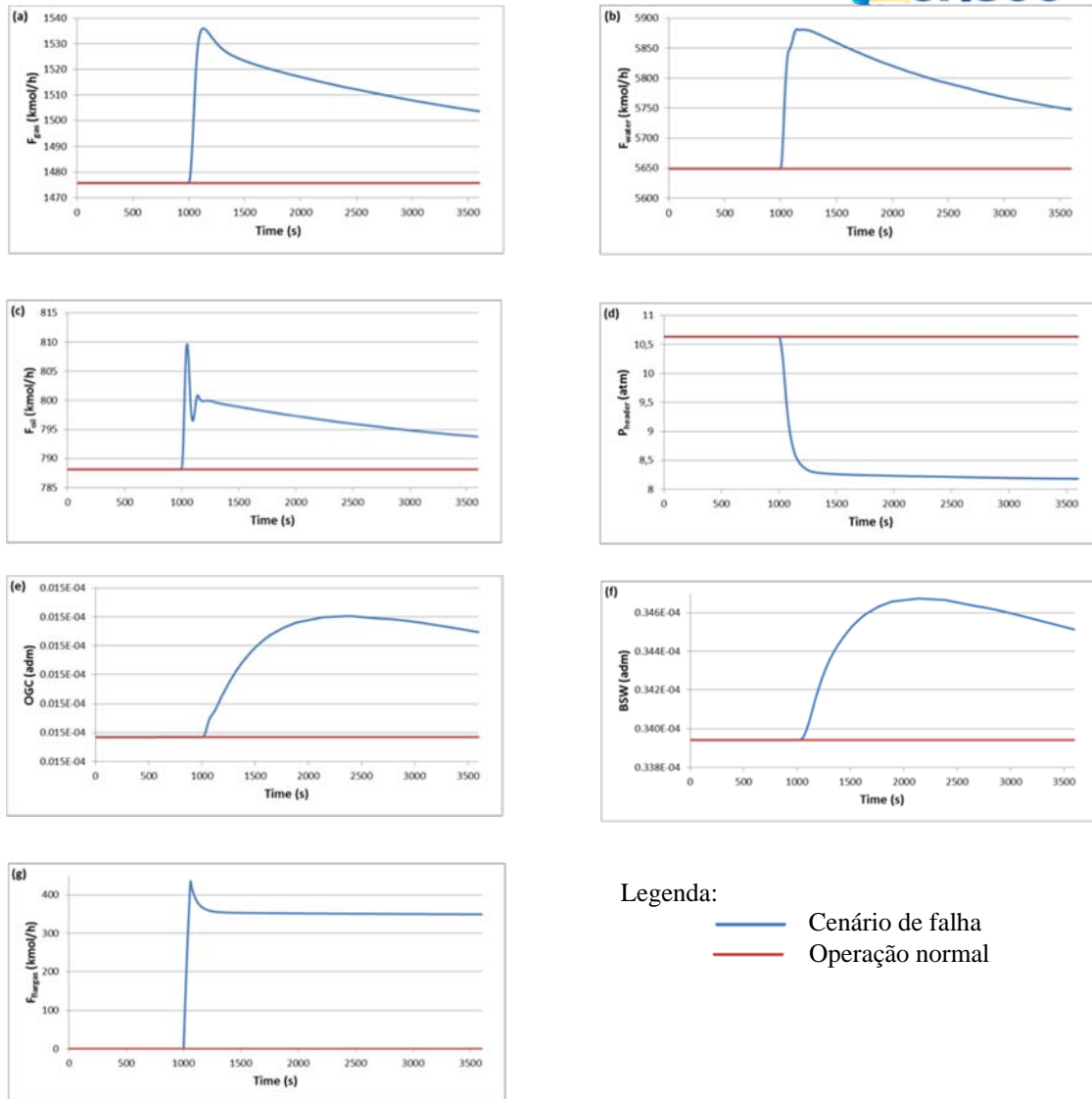


Figura 5: (a) F_{gas} (kmol/h) – produção total de gás; (b) F_{water} (kmol/h) – produção total de água; (c) F_{oil} (kmol/h) – produção total de óleo; (d) P_{header} (atm) – pressão no *manifold* de produção; (e) TOG (adm) – teor de óleo e graxa; (f) BSW (adm) – *basic sediments and water*; (g) F_{flaregas} (kmol/h) – alívio total de gás para o *flare*.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho propõe um novo método para identificar e analisar desvios de processo baseado em simulação de processos. Com relação às suas vantagens, é possível destacar:

- O uso adequado da relação causa-consequência para identificação de desvios de processo, o que levou à caracterização do cenário como a falha nos dispositivos do processo;
- A análise das falhas dos dispositivos leva a um estudo mais completo dos desvios de processo;
- O uso de simulação é necessário para o entendimento das não-linearidade e dinâmica do processo, possibilitando a quantificação dos desvios analisados;
- A separação entre “Análise dos resultados da simulação” e “Análise empírica” possibilita o uso de ferramentas computacionais avançadas sem que a importância da opinião dos especialistas seja desconsiderada.
- Uma única falha em um dispositivo pode causar vários desvios, assim, muitas outras consequências futuras podem ser identificadas.
- Os comportamentos anormais organizados na tabela proposta podem ser utilizados para um diagnóstico em tempo real das falhas nas plantas, o que aumenta a segurança industrial.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Crowl D. A., Louvar J. F., “Chemical Process Safety Fundamentals with Applications”. (2th ed.). New Jersey. Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences (2002).
- [2] Mannan, S., “Lee’s Lost Prevention in the Process Industries – Hazard Identification, Assessment and Control”, Vol. 1, 3rd ed., Oxford: Elsevier Butterworth–Heinemann (2005).
- [3] Kletz T. A., “Hazop-Past and Future”. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 55 263-266 (1997).
- [4] Lawley H. G., “Operability Studies and Hazard Analysis”, *Chem. Eng. Prog.* 70 (4) 45-56 (1974).
- [5] Swann C. D., Preston M. L., “Twenty-Five Years of HAZOPs”. *J. Loss Prev. Process Ind.* 8(6) 349–53 (1995).
- [6] Tyler B. J., “HAZOP Study Training From the 1970s to Today”. *Process Saf. Environ. Prot.* 90 419-423 (2012).
- [7] Dunj6 J., Fthenakis V., V6lchez J. A., Arnaldos J., “Hazard and Operability (HAZOP) Analysis. A Literature Review”. *J. of Hazard. Mater.* 173 19-32 (2010).
- [8] AIChE, “Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis” (2th ed.). New York. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers (2000).
- [9] Shacham M., Brauner N., Cutlip M. B., “Open Architecture Modelling and Simulation in Process Hazard Assessment”. *Computer & Chemical Engineering* 24 415–421 (2004).
- [10] Eizenberg S., Shacham M., Brauner N., “Combining HAZOP with Dynamic Simulation - Applications for Safety Education.” *J. Loss Prev. Process Ind.* 19 754–761 (2006).
- [11] Demichela M., Camuncoli G., Risk Based Decision Making. Discussion on Two Methodological Milestones.” *J. of Loss Prevention Ind.* 28 101-108 (2013).
- [12] Ramzan N., Compant F., Witt W., “Methodology for the Generation and Evaluation of Safety System Alternatives Based on Extended Hazop”. *AIChE* 26 (1) 35-42 (2006).
- [13] Labovsky J., Svandova Z., Markos J., Jelemensky L., “Model-based HAZOP Study of a Real MTBE Plant”. *J. of Loss Prevention Ind.* 20 (3) 230-237 (2007).
- [14] Svandova Z., Jelemensky L., Markos J., Molnar A., “Steady States Analysis and Dynamic Simulation as a Complement in the HAZOP Study of Chemical Reactors”. *Process Saf. Environ. Prot.* 83(B5) 463-471 (2005).
- [15] Soares, R. P., Secchi, A. R., “EMSO: A New Environment for Modelling, Simulation and Optimization”, *Computer Aided Chemical Engineering*, 14 (C) 947-952 (2003).
- [16] Ribeiro, C. H. P., “Multivariable Predictive Control on Platforms for Production of Oil with Quality Constrains”, *Master dissertation (in Portuguese). Electrical Engineering Program – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil*, (2012).
- [17] Bendia, R. M., “Economic Evaluation of Control Strategies for Slug Flow in the Separation Process of Offshore Platforms”, *Master dissertation (in Portuguese). Electrical Engineering Program – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil*, (2013).