

CICLO DE VIDA DE POÇOS DE PETRÓLEO - UMA PERSPECTIVA SOB A ÓTICA DO PENSAMENTO SISTÊMICO

Joaquim Rocha dos Santos ^{(1), (2)}

Carlos Henrique Bitencourt Moraes ⁽²⁾

Danilo Taverna Pereira Martins de Abreu ⁽²⁾

Danilo Colombo ⁽³⁾

Marcelo Ramos Martins ⁽²⁾

RESUMO

Apesar de ter uma das matrizes energéticas mais limpas do planeta, o Brasil ainda depende grandemente do consumo de combustíveis fósseis, sendo a maior parte desse insumo obtido em operações offshore, onde os hidrocarbonetos brutos são extraídos por meio de poços submarinos, muitas vezes perfurados a quilômetros de profundidade e posteriormente beneficiados em refinarias *onshore*. O ciclo de vida desses poços submarinos pode se estender por 20 a 30 anos, e a tecnologia envolvida em todas as suas fases impõe grandes desafios em termos tanto da segurança, quanto do resultado financeiro de toda a operação.

A percepção gerencial de todo ciclo de vida pode melhorar as tomadas de decisão de forma a privilegiar ótimos globais; em outras palavras, decisões nos estágios iniciais do ciclo de vida, tais como nas fases de projeto e construção, não devem se fundamentar somente na análise de consequências percebidas durante estas fases, mas também em todas as outras – produção, intervenção e abandono.

O Pensamento Sistêmico se apresenta como uma forma interessante de abordar o comportamento do poço (e do campo) em sua evolução ao longo do ciclo de vida, em particular usando-se a Dinâmica de Sistemas (DS), ferramenta de modelagem estratégica baseada na teoria de sistemas com realimentação. Desde a década de 1950, a DS se desenvolveu de forma relativamente independente das demais técnicas da Pesquisa Operacional, a qual seu fundador, Jay W. Forrester, a relaciona. DS é uma ferramenta usada por organizações em face de problemas complexos e que desejam uma visão integrada das forças que podem afetar fatores chave anos e décadas no futuro. O uso dessa ferramenta de modelagem pode contribuir para o melhor entendimento dos prós e contras das diversas alternativas que os decisores podem considerar.

Este artigo apresenta um modelo de DS que pretende mostrar como técnicas modernas de manutenção e um tratamento apropriado das incertezas podem, no médio e longo prazo, contribuir de forma relevante para a melhoria de decisões em tempo de projeto, incrementando de forma expressiva o resultado financeiro obtido pelas operadoras. Em paralelo ao uso do Pensamento Sistêmico, esse trabalho introduz o conceito de Dívida Técnica, cunhado e desenvolvido na área da Engenharia de Software, para estabelecer uma métrica que permita a avaliação do desempenho dos poços ao longo de seu ciclo de vida.

¹ Endereço eletrônico para correspondência: jrsantos@usp.br

² Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Riscos (LabRisco) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

³ Petrobras, CENPES

1 INTRODUÇÃO

Apesar de ter uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, a economia do Brasil ainda depende fortemente no uso de petróleo. Considerando que 90% do petróleo produzido no país é oriundo de operações *offshore*, pode-se afirmar que tais operações são de grande relevância para a economia nacional. Por suas características peculiares, as operações *offshore* têm três importantes características: elevada margem de contribuição, necessitam de elevados investimentos, e representam elevados riscos para as empresas em termos de vidas humanas, meio ambiente, ativos e imagem.

Diante desses três fatores, o melhor cenário para as operadoras seria: a) operações com elevadas margens de contribuição, com os poços operando com o mínimo de manutenção; e b) operações tão seguras quanto possível, durante todo o ciclo de vida do poço. O problema é que essas duas metas se contrapõem.

Outro fator importante a ser considerado é o efeito de longo e curto prazo nas diversas decisões tomadas ao longo do ciclo de vida. Por vários motivos, os gerentes podem priorizar os critérios de suas decisões em fatores que levem a melhores resultados no curto prazo, em detrimento do desempenho posterior. Um exemplo desse compromisso entre o curto e o longo prazo seria a decisão gerencial de atrasar a entrega da documentação de um poço no seu *hand over*, seja durante seu projeto, seja durante sua construção, onde diversas atividades urgentes acontecem simultaneamente. Tal decisão teria impacto relevante nas demais fases do ciclo de vida, notadamente nos períodos de intervenção e abandono.

Esse conjunto de decisões que privilegiam o curto em detrimento do longo prazo se acumulam no que poderíamos chamar de uma “dívida técnica”. A Dívida Técnica (DT) é uma metáfora cunhada na área de Engenharia de Software por [1] e se refere aos custos de longo prazo associados aos *shortcuts* tomados durante a fase de desenvolvimento do software, que geram benefícios de curto prazo. Alguns pontos sobre a DT precisam ser enfatizados: a) ela não é necessariamente uma má decisão, uma vez que os benefícios de curto prazo podem ser vantajosos sobre os de longo prazo; b) a DT reflete ganhos financeiros, ou seja decisões que levam ao aumento da DT são sempre motivadas por redução de custos ou aumento de receitas. Desta forma a questão fundamental é: quanto se ganha agora e quanto se terá que pagar no futuro?

Importando o conceito de Dívida Técnica para a engenharia de petróleo, ter-se-ia uma expansão nas consequências, que poderiam ser em termos de recursos financeiros, vidas humanas, impactos ambientais e imagem da companhia. Apesar de discussões éticas e de opiniões diversas, todos esses fatores podem ser monetizados, tendo-se um parâmetro único para tomada de decisão. Como a discussão ética está além do escopo desse artigo, será assumido simplesmente que essa conversão é possível.

Como foi afirmado acima, além do objetivo da elevada margem de contribuição, deseja-se que a operação *offshore* aconteça em um elevado patamar de segurança. Não é raro que os elevados riscos na exploração e produção de petróleo no mar resultem em grandes perdas para as operadoras e demais *stakeholders*. Entre esses casos, talvez o acidente mais icônico tenha sido o ocorrido no campo de Macondo, no Golfo do México, que levou a perda da sonda *Deepwater Horizon*. Esse acidente custou várias vidas humanas, perda de ativos e teve enormes impactos tanto ambientais como em termos de imagem da operadora.

Muitos pesquisadores abordam a segurança de operações de exploração de petróleo *offshore* e similares usando métodos tradicionais de análise de risco. Uma análise bem completa dessas abordagens pode ser encontrada em [2]. Outros autores argumentam que essas análises podem ser expandidas englobando outros aspectos tais como políticas governamentais, percepções sociais e decisões gerenciais [3], [4] e [5]. O STAMP (System-Theoretic Accident Modelling Process) é uma técnica que engloba todos os aspectos de um acidente [5]. Essa abordagem afirma que a segurança de um Sistema é uma propriedade emergente de um sistema complexo e que só pode ser abordada usando-se ferramentas sistêmicas, como por exemplo Engenharia de Sistemas (ES) e Dinâmica de Sistemas (DS) [6]. De forma resumida, tais ferramentas são usadas para entender a estrutura do sistema em seus diversos níveis e a DS pode ser usada para entender como os níveis hierárquicos mais altos do sistema (governo, agências reguladoras, decisões empresariais e outras) interagem entre si e com os níveis mais baixos do sistema (decisões operacionais, estrutura física e outros).

Considerando os aspectos apresentados, considera-se interessante a concepção de novas ferramentas de análise que auxiliem os tomadores de decisão diante de um ambiente tão complexo. Um ponto interessante a

ser explorado para se melhorar a tomada de decisão é a comunicação entre os diversos níveis e entre os diversos setores, dentro desses níveis. Uma forma de conseguir essa melhor comunicação é por meio do desenvolvimento de um modelo de DS [7].

2 METODOLOGIA

A Dinâmica de Sistemas foi criada no Massachusetts Institute of Technology no final da década de 1950 por Jay W. Forrester. Seu livro seminal foi *Industrial Dynamics* [8]. Nesse livro, Forrester discutiu uma forma diferente de se estudar o comportamento dos sistemas industriais, com o propósito de mostrar como as políticas, decisões, estrutura e atrasos relacionados entre si influenciam o comportamento dos sistemas e sua estabilidade. O método pretendia integrar áreas gerenciais funcionalmente separadas – marketing, finanças, pesquisa e desenvolvimento, recursos humanos, produção e outros.

A **Fig. 1** mostra um modelo básico de DS contendo seus elementos fundamentais. As discussões desta seção são baseadas em [9]. Observe-se que a variável População é representada dentro de um retângulo. Variáveis desse tipo são chamadas de estoques e representam as variáveis de estado dos sistemas, que acumulam todos os nascimentos em mortes ocorridos ao longo do tempo, desde um instante inicial. O valor da variável População no instante inicial é representado pelas condições iniciais do sistema.

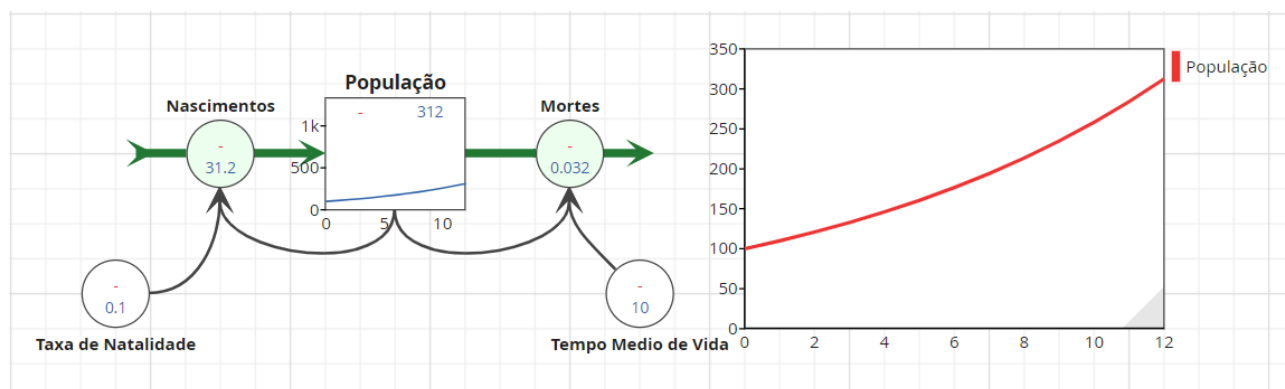


Fig. 1 – Um modelo básico de Dinâmica de Sistemas

Duas variáveis estão conectadas à População – Nascimentos e Mortes. A primeira adiciona à População; a segunda reduz a População. Essas variáveis também são de um tipo peculiar, chamado Fluxo, Vazão ou Taxa (observe-se que tem formato e cor diferentes - verde); esse tipo de variável é o único que pode alterar um estoque. Há duas variáveis auxiliares no modelo – Taxa de Natalidade e Tempo Médio de Vida. Um modelo matemático equivalente a esse descrito na **Fig. 1** seria:

$$População(t) = \int_{t_0}^t [Nascimentos(s) - Mortes(s)] ds \quad (1)$$

$$População(t_0) = 100 \quad (2)$$

$$Nascimento(t) = População(t) * Taxa de Natalidade \quad (3)$$

$$Mortes(t) = População(t) / Tempo Médio de Vida \quad (4)$$

$$Tempo Médio de Vida = 10 \quad (5)$$

O modelo de DS construído seguiu a metodologia proposta por Kim Warren na 33ª Conferência Internacional da Sociedade de Dinâmica de Sistemas [10], e é mostrada na **Fig. 2**. A proposta de Warren é similar ao SCRUM [11], uma proposta ágil para o desenvolvimento de *software*, “... onde o engajamento e satisfação do usuário são primordiais e alcançados pela entrega contínua de *software* funcional”.

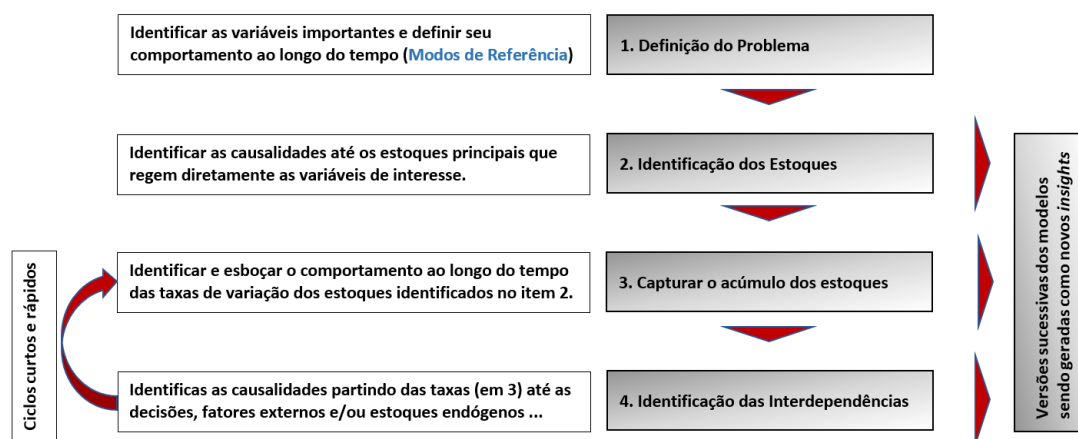


Fig. 2 – Processo do método de desenvolvimento ágil de modelos

Os quatro princípios por trás da metodologia ágil proposta por Warren são [10]:

- Explicar, antecipar e melhorar como os resultados importantes variam ao longo do tempo (veja Fig. 2, Box 1 – *Definição do Problema*);
- Em cada instante de tempo, esses resultados são função direta das quantidades dos estoques que representam as variáveis de estado do sistema. Esse comportamento ao longo do tempo (*BOT – behavior over time*) dos estoques dos quais essas variáveis de interesse dependem (veja Fig. 2, Box 2 – *Identificação dos estoques*);
- A quantidade acumulada em qualquer estoque (variáveis de estado do sistema) depende exclusivamente dos valores prévios dos seus fluxos associados (veja Fig. 2, Box 3 – *Capturar o acúmulo dos estoques*); e
- A cada instante de tempo, esses fluxos dependem dos valores acumulados nos estoques, das decisões dos diversos *stakeholders* e/ou dos fatores exógenos ao sistema (veja Fig. 2, Box 4 – *Identificação das Interdependências*).

Deve-se observar que os itens c) e d) criam interdependência e realimentação entre as diversas variáveis [10].

3 Modelo Dinâmico

3.1 Definição do Problema

Como discutido na introdução, é razoável assumir que as operadoras têm como meta gerir seus negócios dentro de um ambiente lucrativo e seguro. Para atender ao primeiro passo do processo ágil foram escolhidas duas variáveis: fluxo de caixa e o risco operacional. A Fig. 3 mostra o modo de referência para o fluxo de caixa. É normal que o resultado inicial das operações seja negativo, uma vez que há intenso investimento em capital para a construção e comissionamento dos poços; após esse período inicial, os poços passam a produzir, gerando resultado positivo; após o comissionamento do último poço do campo, esse resultado positivo se estabiliza, decaindo levemente ao longo do tempo, à medida que o poço é depletado.

A Fig. 4 mostra o modo de referência para o risco operacional. Toda operadora tem seus padrões e mentalidade de segurança, atende em maior ou menor grau a legislação, tem procedimentos operacionais próprios etc. Esse conjunto único de características leva a um padrão normal de segurança da empresa, que neste trabalho é adotado simplesmente como o valor unitário; ou seja, o risco operacional normal é igual a 100, ou uma unidade. Quando o risco aumenta, fica acima do seu patamar normal, ou seja, maior que 1; por outro lado, quando diminui, fica menor que 1. A adoção de valores percentuais se mostra útil principalmente porque até o momento não se tem notícia de parâmetros fixados pela legislação em termos de risco máximo aceitável.

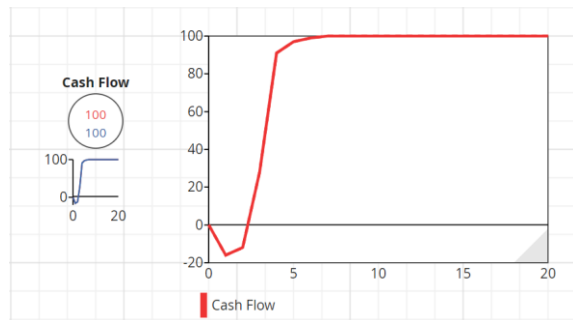


Fig. 3 – Modo de Referência para o Fluxo de Caixa

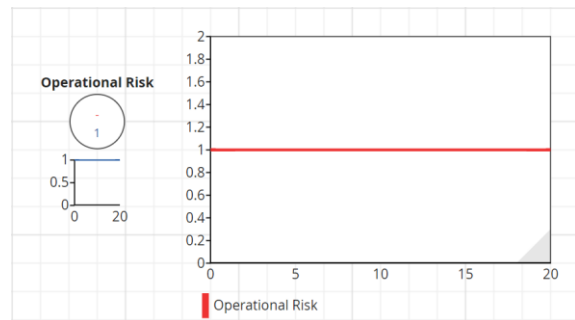


Fig. 4 – Modo de Referência para o Risco Operacional

3.2 Desenvolvimento do Modelo

Para o desenvolvimento do modelo de Dinâmica de Sistemas foi usado um software chamado SYSDEA (<https://app.sysdea.com/>). Por limitação de escopo deste trabalho, será apresentada apenas a Carta de Limites do Modelo (CLM) e seu Diagrama de Setores, ferramentas comumente usadas para explicar modelos de DS a quem não participou do processo de modelagem.

A CLM mostra como são tratadas as principais variáveis do sistema. Aquelas que foram incluídas no modelo, afetando as demais e sendo afetadas por ela são chamadas de variáveis endógenas. As variáveis que afetam variáveis endógenas ao modelo, mas não são afetadas por nenhuma variável do modelo, são chamadas de variáveis exógenas. Finalmente, há um conjunto de variáveis que não são consideradas no processo de modelagem, mas que deveriam ser investigadas em estudos futuros; essas variáveis são chamadas de excluídas, e normalmente representam aspectos interessantes para pesquisas futuras.

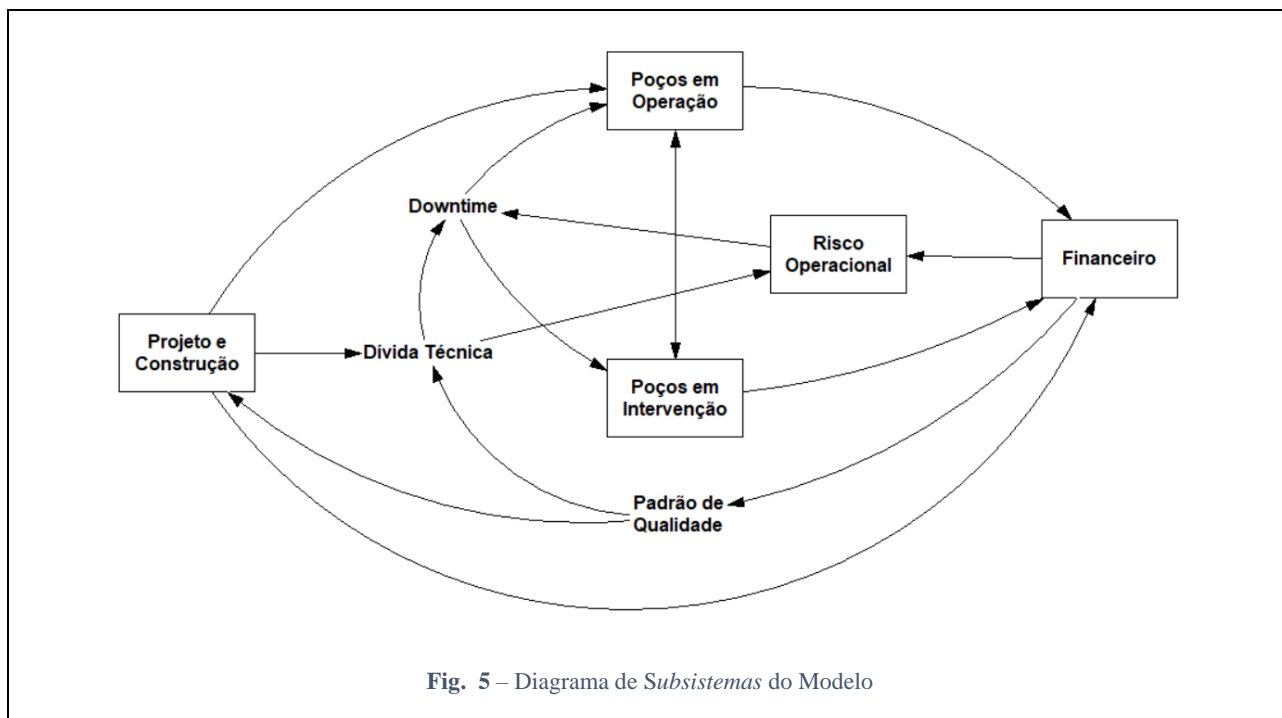
Tab. 1 – Carta de Limites do Modelo

Endógenas	Exógenas	Excluídas
Poços em Projeto e Construção	Preço do Barril de Petróleo	Requisitos do SGIP ⁴
Poços em Produção	Custo de Perfuração do Poço	Opções de configuração de poços
Poços em Intervenção	Custo de Intervenção do Poço	
Dívida Técnica do Campo		
Risco Operacional		
Padrão Qualidade da Operadora		
Margem de Contribuição de um Poço em Operação		
Efeito da Pressão de Cronograma na Qualidade do Projeto		
Efeito da Pressão de Cronograma no Acréscimo de DT		
Tarefas de Projeto e Construção		
Efeito da DT no Tempo Médio de Intervenção dos Poços		

A Fig. 5 apresenta o Diagrama de Subsistemas do modelo. Pode-se ver que as atividades que acontecem durante as fases de Projeto e Construção afetam a Dívida Técnica, os Poços em Operação e o Setor Financeiro. O ciclo de vida de um poço de petróleo começa na fase de projeto, passando em sequência para a fase de construção; por simplicidade, essas duas fases foram reunidas em um único bloco, uma vez que sua separação elevaria o nível de complexidade do modelo, sem um ganho correspondente em termos de *insights*

⁴ Sistema de Gerenciamento de Integridade de Poços, proposto por [13]

para os tomadores de decisão. Durante as fases de P&C há elevado investimento em capital, fazendo com que esse setor do modelo afete de forma importante o setor financeiro. As decisões tomadas durante o projeto e construção dos poços podem gerar DT; a dinâmica envolvida nessa geração de DT e atrasos de entrega dos poços são explicadas em parte separada do modelo de simulação.



Quando o poço está pronto, termina a fase de P&C iniciando a de Produção. Os poços passam a produzir e com isso geram recursos financeiros (afetando o setor financeiro). Eventualmente, os poços passam por um período de manutenção (chamado no *metier* de intervenção). A frequência com que os poços ficam inativos para manutenção (chamado de *downtime*) é afetado pela DT e pelo padrão de risco operacional aceito pela operadora. Por exemplo, mesmo diante de algum indício importante de comprometimento da integridade do poço, uma operadora pode optar por operar o poço de maneira menos segura.

Durante os períodos de intervenção, as receitas dos poços cessam e sua manutenção gera elevados custos; esses dois aspectos afetam de forma importante o setor financeiro.

O Padrão de Qualidade da empresa representa neste modelo um papel fundamental. Esse padrão afeta a maneira como as fases de P&C se desenrolam, e em que níveis a DT é gerada. Padrões baixos de qualidade levam a muitos retrabalhos nas fases de P&C e elevam a DT.

O setor financeiro coleta os resultados financeiros ao longo do ciclo de vida e é fator gerador de pressão nos demais setores. Parece haver a tendência natural de se relaxar a qualidade quando uma empresa se encontra em dificuldades financeiras. De forma similar, pressões financeiras forçam os gerentes a tomar decisões que privilegiem o curto prazo, em detrimento da necessidade de compensações posteriores (definição de DT). Pressões financeiras também podem conduzir as equipes responsáveis pela operação a aceitar maiores riscos operacionais, o que pode comprometer a segurança da operação.

A partir dos conceitos descritos, foi desenvolvido um modelo matemático preliminar, que foi detalhado em [12]. O leitor interessado em conhecer a arquitetura do modelo e verificar seus resultados poderá acessar o modelo por meio dos *hyperlinks* abaixo:

- a) Modelo principal: <https://bit.ly/2Jn4X5M>
- b) Submodelo Projeto e Construção: <https://bit.ly/2UA63MM>.

4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Para os propósitos deste trabalho aplicou-se uma variação no padrão de qualidade normal da empresa, alterando-se de 100% para 90%. Considerando que o modelo é preliminar, a análise das tendências é mais importante do que se prender aos valores numéricos. A Fig. 6 mostra a variação na Lucro Bruto do Campo (*Field Gross Profit*). Pode-se observar que (devido a falhas de qualidade) há atrasos na entrega dos poços (da ordem de meses) e esses atrasos geram um resultado inferior ao esperado pela operadora. Essa redução no resultado pode significar a adoção de políticas menos aconselháveis tais como relaxamento do padrão de qualidade e aceitar que os níveis de risco operacionais subam, para não prejudicar ainda mais os resultados da operação. A Fig. 7 mostra como o Risco Operacional é afetado (novamente, sugere-se não se prender ao valor, mas a dinâmica) das variáveis.

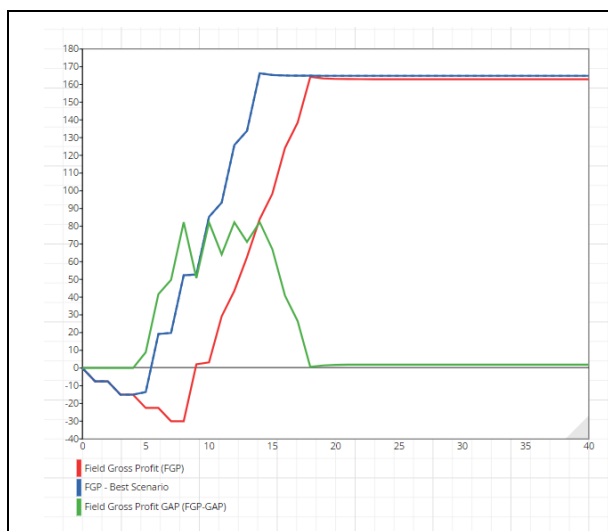


Fig. 6 – Mudança no Fluxo de Caixa (Qualidade = 90%)

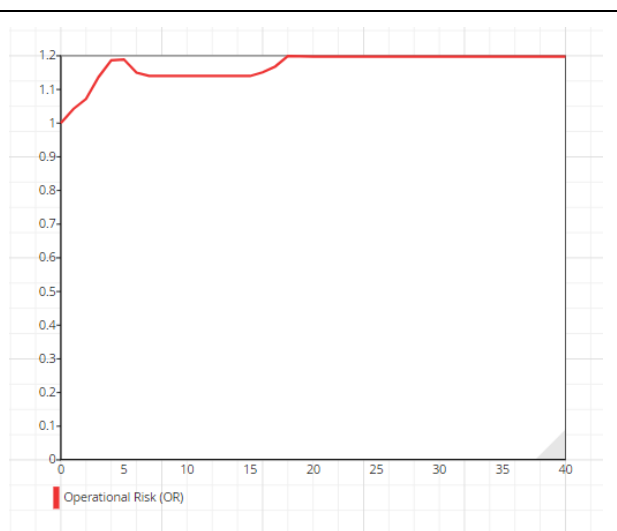


Fig. 7 – Mudança no Risco Operacional (Qualidade = 90%)

Os resultados apresentados pelo modelo apresentam comportamento não intuitivo. A resposta do modelo mostrando aumento dos riscos operacionais e a redução do resultado financeiro, tanto no curto quanto no longo prazo mostra que a prática de sacrificar a qualidade em busca de benefícios de curto-prazo implica em perdas (que podem ser importantes) tanto no curto quanto no longo prazo. O provável aumento no tempo de *downtime* afetará os poços durante toda a fase de Produção. A redução na disponibilidade dos poços deverá reduzir o resultado da operação, o que aumentará ainda mais as pressões por uma operação menos segura.

Considerando-se os resultados obtidos, parece apropriado que a prática de se relaxar os padrões de qualidade para a obtenção de vantagens no curto prazo deva ser reavaliada. Os *insights* e resultados apresentados pelo modelo preliminar sugerem que ele deva ser expandido para um modelo completo, o que incluirá consultas a especialistas e obtenção intensiva de dados, de forma a se tornar um modelo quantitativamente confiável onde políticas de intervenção no sistema possam ser projetadas e testadas.

5 AGRADECIMENTOS

Este artigo relata parte dos resultados gerais obtidos no projeto de pesquisa e desenvolvimento número 5850.0106642.18.9, patrocinado pela Petrobras, cujo apoio os autores agradecem. O último autor também agradece o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através da concessão 304533 / 2016-5.

6 REFERÊNCIAS:

- [1] W. Cunningham, The WyCash portfolio management system, Vancouver, British Columbia, Canada, 1992. doi:10.1145/157710.157715.
- [2] M. Leimeister, K. Athanasios, A review of reliability-based methods for risk applications in the offshore wind industry, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2018) 1065–1076.
- [3] C. Perrow, *Normal Accidents: Living with High Risk Technologies*, Princeton University Press, 1999.
- [4] B. Rasmussen, K. Petersen, Plant functional modelling as a basis for assessing the impact of management on plant safety, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* (1999) 201–207.
- [5] N.G. Leveson, *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*, 2011. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [6] C.H. Fleming, N. Leveson, Integrating Systems Safety into System Engineering during Concept Development, in: 25th Annu. INCOSE Int. Symp., Seattle, 2015.
- [7] N. Ghaffarzadegan, J. Lyneis, G.P. Richardson, How small system dynamics models can help the public policy process, *Syst. Dyn. Rev.* 27 (2011) 22–44.
- [8] J.W. Forrester, *Industrial Dynamics*, Cambridge, MA, 1961.
- [9] J. Sterman, *Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World.*, Irwin McGr, New York, 2000.
- [10] K. Warren, Agile SD: fast, effective, reliable., in: Proc. 33rd Int. Conf. Syst. Dyn. Soc., Cambridge, MA, 2015.
- [11] J.J. Shuterland, *Scrum: The Art of Doing Twice the Work in Half the Time*, Currency, 2014.
- [12] J.R. Santos, D.T.M.P. Abreu, C.H.B. Morais, D. Colombo, M.R. Martins, Oil Well Life Cycle - A Perspective from System Thinking, in: 29th Eur. Saf. Reliab. Conferecne, Hannover, 2019.
- [13] ANP, Resolução ANP nº 46 de 01/11/2016, Rio de Janeiro, 2016.