**ESCOLHA TECNOLÓGICA UTILIZANDO FLUXOS GEOMÉTRICOS DIFERENCIAIS EM TOPOLOGIAS ENTRÓPICAS: UMA APLICAÇÃO EM PROJETO DE POÇO CONTENDO COMPLETAÇÃO SELETIVA EM 3 ZONAS EM POÇO ABERTO DE 12 ¼”, EM AMBIENTE PROPÍCIO À PERDA DE FLUIDO**

Carlos Magno C. Jacinto1, PETROBRAS/CENPES

**ABSTRACT**

O projeto de poço PACI 3 Zonas (Poço aberto Completação Inteligente com 3 zonas produtoras ou injetoras) busca reduzir as desvantagens identificadas para CI (Completação Inteligente) convencional e PACI 2+1 (Poço Aberto Completação Inteligente com 2 zonas produtoras ou injetoras conjuntas e uma zona independente), devendo atender ao escopo de controle remoto independente de 3 intervalos e a melhoria na previsibilidade das operações de Heavy Workover (manutenção do poço de alto custo e impacto), minimizando riscos inerentes às operações de retirada de coluna com formação exposta.

Esta análise tem como objetivo conceituar e subsidiar a escolha de uma configuração que permita a utilização da completação inteligente em poços em até 3 zonas e completação inferior desacoplada em poço aberto de 12 ¼” nos projetos de poços de desenvolvimento de produção do pré-sal.

Um dos pontos mais críticos para implantação da solução PACI 3 zonas é o desenvolvimento da SSD de 9 ⅞”, com a shifter correspondente (válvula de fluxo com camisa deslizante e acionamento mecânico).

Foram selecionados 5 diferentes projetos de poços para o cenário do pré-sal, comparados com o caso basecom a utilização da CI convencional. Para a definição do projeto de poço (e definição de requisitos de confiabilidade para os equipamentos que deverão ser desenvolvidos) foi desenvolvida uma metodologia baseada na construção de uma topologia entrópica para cada projeto de poço considerado (e caso base convencional) e subsequente aplicação de fluxo geométrico diferencial para definição da energia necessária para dissipação das incertezas de cada projeto. O critério de ranqueamento é o de menor energia e menor tempo de extinção da variedade entrópica – projeto de poço. Duas conjecturas foram propostas como fundamentais para esse estudo.

1. **PACI 3 ZONAS**

O PACI 3 Zonas busca eliminar as desvantagens identificadas para CI convencional e PACI 2+1, devendo atender ao escopo de controle remoto independente de 3 intervalos e a melhora na previsibilidade das operações de Heavy Workover, minimizando riscos inerentes às operações de retirada de coluna com formação exposta.

A fase inicial do desenvolvimento da configuração contemplou a elaboração de 5 alternativas, de (A à E) em poço aberto de 12 ¼”, com coluna de completação instalada em duas manobras (completação inferior e superior), que permitissem altas vazões de produção.

**1.1. Alternativa A**

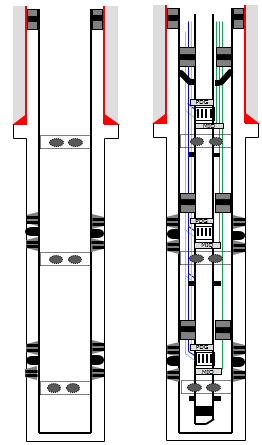
Esta alternativa, ilustrada na Figura1, consiste em:

• Completação Inferior (cauda) de 9 ⅞” com extremidade tamponada:

* LinerHanger e Liner Packer de 9 ⅞”,
* Barreiras mecânicas de anular e
* Válvulas de camisa deslizante de 9 ⅞” de acionamento mecânico em cada intervalo.

• Completação Superior (inteligente):

* ICVs;
* Packer Copo
* Packers Feed-thru (porintervalo)
* MPDG (por intervalo);
* MIQ;
* Shifters residentes para acionamento das válvulas instaladas na cauda e
* Bull Plug.



(a) (b)

Figura 1: (a) a cauda de 9 ⅞” e (b) completação superior no interior da cauda.

Após instalação da cauda, o Liner Packer, os tubos e as válvulas mecânicas fechadas promovem o isolamento da formação durante a descida da completação, viabilizando esta operação, inclusive, em ambientes de perda total de fluido.

**1.2 Alternativa B**

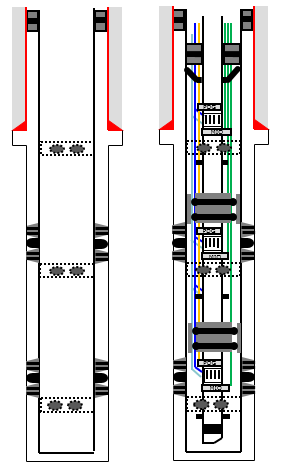
Esta alternativa, ilustrada na Figura 2, consiste em:

• Completação Inferior (cauda) de 9 ⅞” com extremidade tamponada

* LinerHanger e Packer de 9 ⅞”;
* Barreiras mecânicas de anular;
* Extensões selantes (Superfícies polidas) e
* Válvulas de camisa deslizante de acionamento mecânico de 9 ⅞” em cada intervalo.

• Completação Inteligente:

* ICV (por intervalo);
* Packer Copo
* Packer Feed-through (intervalo superior);
* Mandril de “Conjunto de Selos Feed-through” (SSA) (intervalos intermediário e inferior);
* MPDG (por intervalo);
* MIQ;
* Shifters residentes para acionamento das válvulas instaladas na cauda; e
* Bull Plug.



(a) (b)

Figura 2: (a) cauda de 9 ⅞” e (b) completação superior no interior da cauda.

**1.3AlternativaC**

Esta alternativa, ilustrada na Figura 3, consiste em:

• Completação Inferior (cauda) de 9 ⅞” com extremidade tamponada

* LinerHanger e Liner Packer de 9 ⅞”;
* Liner com plugues solúveis e discos de ruptura e
* Barreiras mecânicas de anular.

•Completação Superior (inteligente):

* ICVs;
* Packer Copo;
* Packers Feed-thru (porintervalo);
* MPDG (por intervalo);
* MIQ e
* Bull Plug.

### 

### (a) (b)

Figura 3: (a) cauda de 9 ⅞” e (b) completação superior no interior da cauda.

**1.4 Alternativa D**

Esta alternativa, ilustrada na Figura 4, consiste em:

• Completação Inferior (cauda) de 9 ⅞” com extremidade tamponada:

* LinerHanger e Liner Packer de 9 ⅞”;
* Liner com plugues solúveis e discos de ruptura e
* Barreiras mecânicas de anular.

•Completação Superior (inteligente):

* ICV (por intervalo);
* Packer Copo
* Packer Feed-thru (intervalo superior);
* Mandril de “Conjunto de Selos Feed-through” (SSA) (intervalos intermediário e inferior);
* MPDG (por intervalo);
* MIQ e
* Bull Plug.

### 

### (a) (b)

Figura 4: (a) cauda de 9 ⅞” com plug solúvel e (b) completação superior no interior da cauda.

**1.5 Alternativa E**

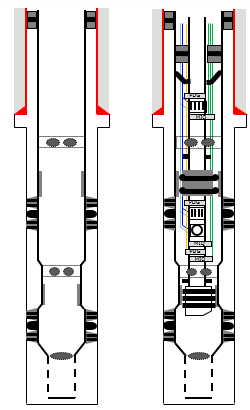
Esta alternativa, ilustrada na Figura 5, consiste em:

• Completação Inferior (cauda) de 9 7/8” com extremidade tamponada

* LinerHanger e Packer de 9 7/8”;
* Barreiras mecânicas de anular;
* Extensões selantes (Superfícies polidas) e
* 01 válvula de camisa deslizante de acionamento mecânico de 9 7/8”
* 01 válvula de camisa deslizante de acionamento mecânico de 6 5/8”
* 01 válvula de isolamento de fundo (VIF) de 5 ½”
* Liner furado de 5 ½”

• Completação Inteligente:

* Packer Copo;
* Packer Feed-through (intervalo superior);
* ICV (intervalos superior e intermediário);
* VHIF intervalo inferior;
* Mandril de “Conjunto de Selos Feed-through” (SSA) (intervalo intermediário);
* MPDG (por intervalo);
* MIQ (zonas superior e inferior);
* Locator (zona inferior);
* Shifters residentes para acionamento das válvulas instaladas na cauda e
* Bull Plug.



(a) (b)

Figura 5: (a) cauda combinada 9 ⅞”x 7 ⅝”x 5 ½” e (b) completação superior no interior da cauda.

* 1. **Completação inteligente convencional**

Completação Inteligente Convencional com coluna integral e bi-engastada, com válvulas de controle remoto e independente das zonas, conforme mostrado na Figura 6.

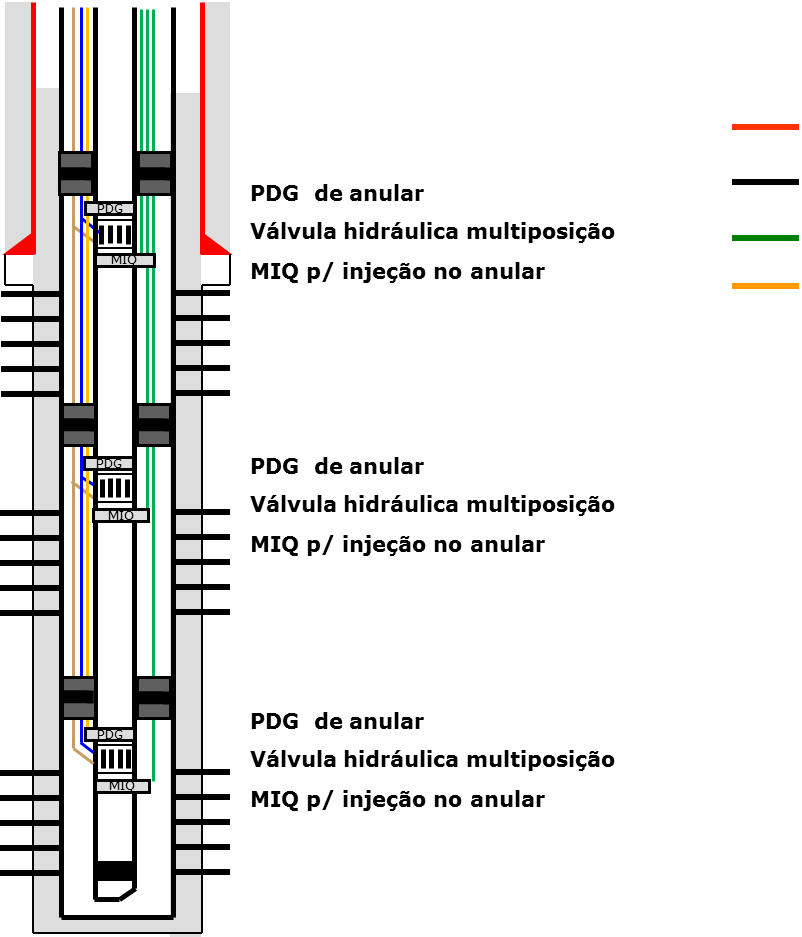


Figura 6: Ilustração da CI 3 zonas.

Essa configuração é utilizada em poços com reservatório perfurado em diâmetro de 12 ¼”, revestimento de produção de 9 ⅝” ou 9 ⅞”, cimentado e canhoneado.

Esta configuração apresenta a vantagem de prover gerenciamento remoto e independente de até 3 zonas e ser instalada em manobra única e com todos os equipamentos montados e testados na superfície.

A coluna de produção é integral, não havendo separação entre completação inferior e superior, o que eleva a complexidade das operações de Heavy Workover e dificultam ou impedem a instalação deste tipo de completação em ambiente de perda total.

Caso as perdas ocorram na zona intermediária ou inferior, a contingência seria antecipar a descida do revestimento de produção (9 ⅝” ou 9 ⅞”) logo acima da zona de perda e perfurar estes intervalos em 8 ½”, utilizando técnicas MPD. Neste caso, poderia se instalar uma completação inferior para isolar os intervalos inferiores, utilizando técnicas de MPD.

Caso ocorra perda total na zona superior, a contingência seria descer o revestimento de produção (9 ⅝” ou 9 ⅞”) no topo do reservatório, perfurar o reservatório em 8 ½” e instalar uma completação simples, ou considerando as técnicas atuais, completar com seletividade em 2 zonas, vide a configuração PACI 2 zonas. Cabe ressaltar que as contingências citadas implicam em complexidade na prontidão e disponibilidade de equipamentos e de sonda com MPD.

1. **CRITÉRIO DE SELEÇÃO DA ALTERNATIVA**

As alternativas C e D foram descartadas por não atenderem à premissa de segurança de poço, com o isolamento do reservatório para a intervenção de Heavy Workover.

Com as alternativas de projeto de poço restantes, foi desenvolvida e aplicada uma metodologia quantitativa para a determinação da configuração com menor complexidade.

* 1. **Análise quantitativa**

A metodologia desenvolvida para esse estudo pode ser vista em detalhes na figura 7.

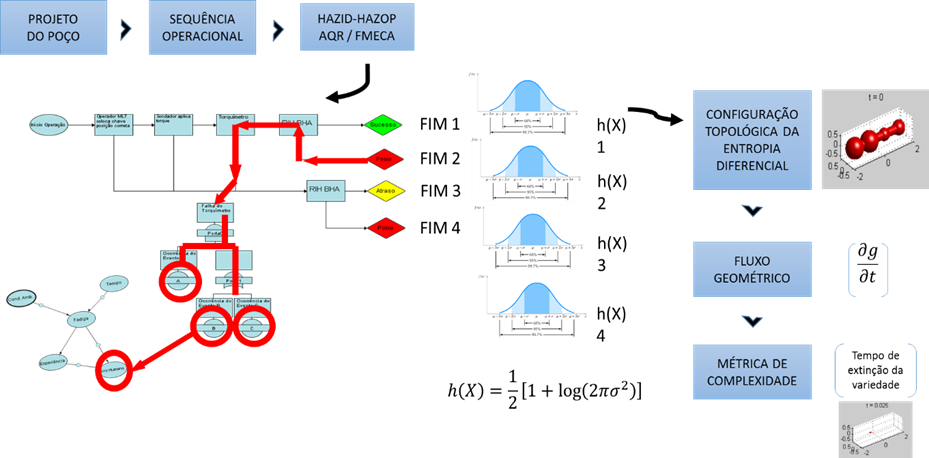


Figura 7: Metodologia desenvolvida.

O primeiro passo da metodologia considera a análise qualitativa HAZID-HAZOP do projeto de poço utilizando a alternativa tecnológica associada e, a partir daí, são construídos modelos híbridos de confiabilidade que modelam os principais desvios encontrados, com a propagação das suas respectivas incertezas (entropia). Nos estados finais de cada modelo híbrido encontramos a função agregativa de cada um dos caminhos possíveis identificados com suas respectivas incertezas. Aplicando em cada uma dessas funções o “Princípio da Máxima Entropia”, teremos então uma medida de entropia máxima para cada desses fins.

Com essas medidas, aplicamos a “Conjectura I” e construímos uma “variedade entrópica” que representa esse conjunto de máxima entropia do projeto. Essa variedade é uma representação topológica (mudança de domínio) que possibilita a aplicação da “Conjectura II” que nos levará a medida de complexidade do projeto.

As provas das conjecturas e detalhes metodológicos são bastante extensos para esse trabalho, não sendo foco do presente artigo. No anexo apresentamos mais detalhes sobre a metodologia desenvolvida.

Para a elaboração da primeira etapa deste trabalho, foi aplicada a técnica de HAZID/HAZOP das alternativas em estudo,identificando os principais desvios para a intervenções de completação e Heavy Workover, com as respectivas criticidades, que receberam valores inteiros, de 1 a 3, sendo o valor 3 correspondente ao mais crítico.

A dimensão da criticidade é composta pela frequência, severidade e capacidade de detecção do desvio.

Os desvios associados à cada alternativa estão destacados e para cada um deles foi criado um modelo de quantificação e propagação de incerteza, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Desvios levantados para cada um dos casos analisados.



A partir dos estudos de HAZID/HAZOP obtemos o levantamento de criticidades (Tabela 2).

Tabela 2: Resumo das criticidades por alternativa para o ciclo de vida do poço.



A Figura 8 mostra, graficamente, a evolução das criticidades, para cada uma das alternativas, na instalação e no Heavy Workover.

Figura 8: Criticidades por alternativa para o ciclo de vida do poço.

A probabilidade de perda foi modelada através da combinação de fontes de dados de especialistas e dados empíricos provenientes dos poços já construídos, utilizando técnicas de inferências bayesiana. Os cenários foram simulados com probabilidades de perda de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de chances de ocorrência.

A construção e quantificação do modelo de falha do poço segue a metodologia híbrida desenvolvida (Boletim de Produção de Petróleo; Jacinto, Droguett e Garcia, 2006).

As figuras 9a12 ilustram o modelo de falha do caso base, Alternativas A, B e E, respectivamente, considerando as fases de instalação e Heavy Workover.

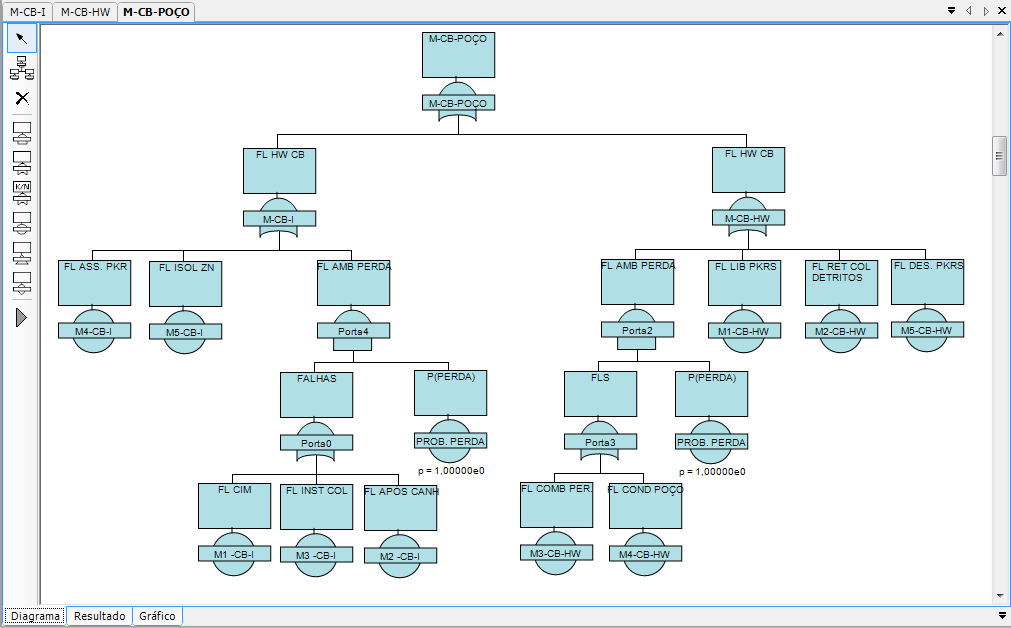


Figura 9: Modelo de falhas para o caso base.

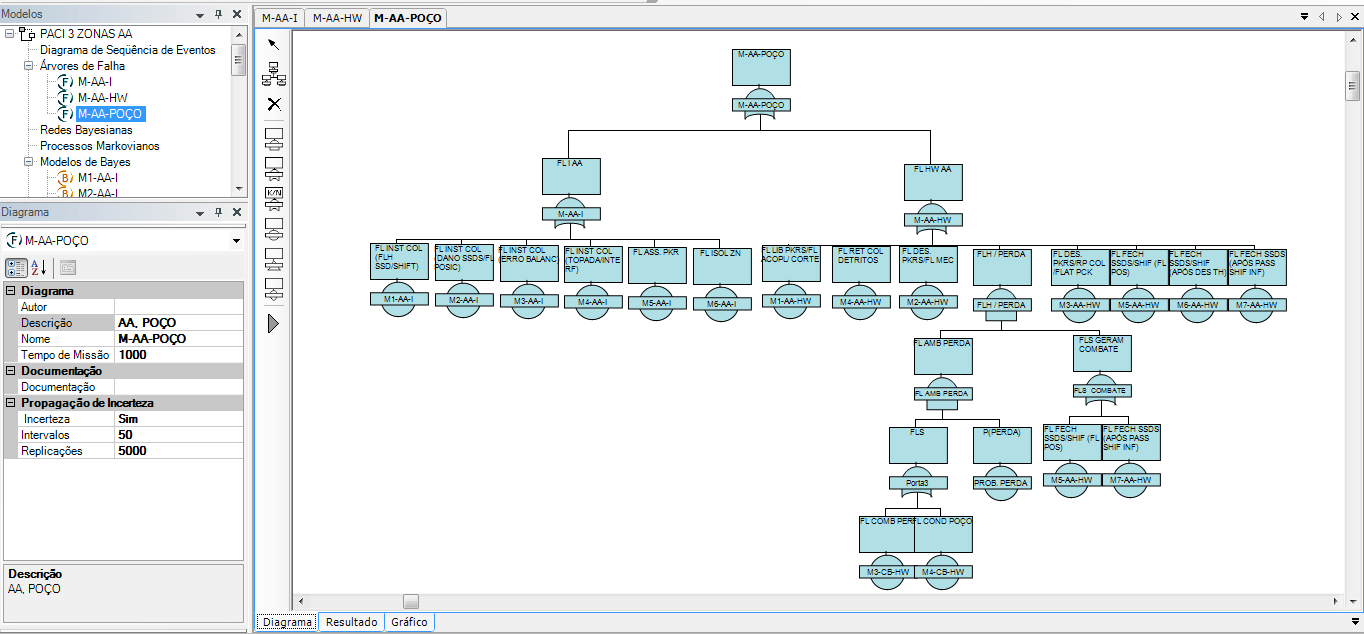


Figura 10: Modelo de falhas para o caso A.

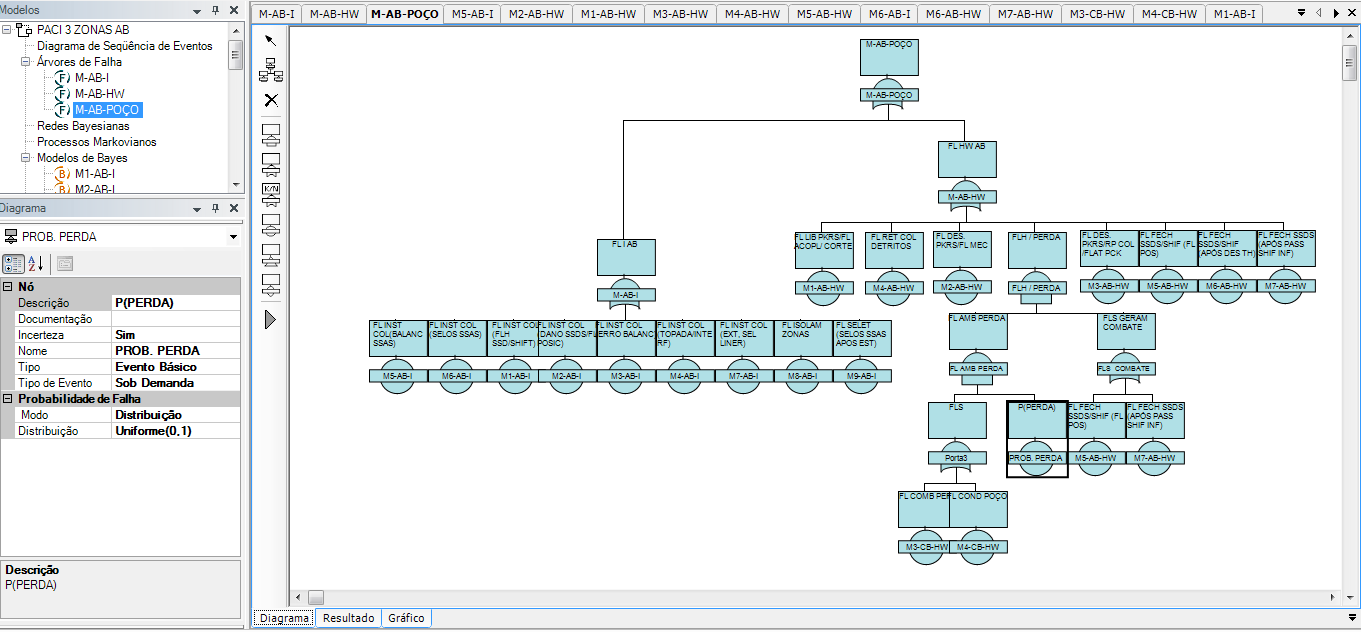


Figura 11: Modelo de falhas para o caso B.

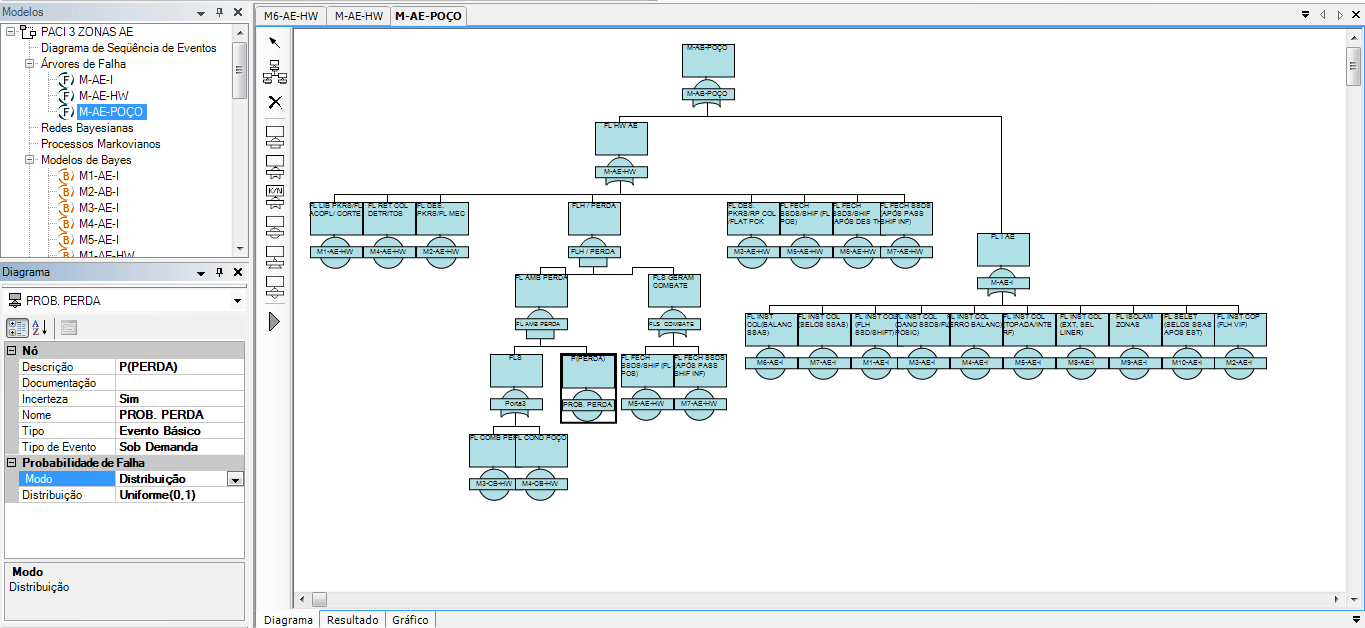


Figura 12: Modelo de falhas para o caso E.

A Tabela 3 apresenta os resultados das simulações dos modelos de cada alternativa com a propagação das incertezas P10, P50 e P90 para cada cenário de probabilidade de perda.

Tabela 3: Resultados para cada uma das Alternativas.



O gráfico, apresentado na Figura 13, representa a probabilidade de falha no poço no caso base, para cada cenário de probabilidade de perda: 0%, 25% ,50%, 75% e 100%, com a respectiva propagação de incerteza em P10, P50 e P90. Durante o estudo, foi observado que o Caso Base é o que apresenta maior sensibilidade à ocorrência de perda severa.

Figura 13: Probabilidades de falha no Caso Base.

Os gráficos, ilustrados nas Figuras14 e 15, representam a probabilidade de falha no poço nas alternativas A, B e E, para cada cenário de probabilidade de perda: 0%, 25%,50%, 75% e 100%, com a respectiva propagação de incerteza em P50 e P90.

Figura 14: Probabilidades de falha para as Alternativas A, B e E em P50.

Figura 15: Probabilidades de falha para as Alternativas A, B e E em P90.

De acordo com esses resultados, a alternativa E foi considerada a mais adequada. Por sua vez, a B foi apontada como a mais complexa.

A partir dos resultados das simulações das probabilidades de falhas de cada alternativa e suas incertezas associadas foram identificados os desvios que poderiam ter suas probabilidades de ocorrência e incertezas reduzidas a partir de “ações de engenharia”, tais como, definição de taxas de falhas de equipamentos ainda não desenvolvidos ou com pouco histórico de uso para estas aplicações (SSD 9 ⅞”, SSA, Shifter residente e VIF).

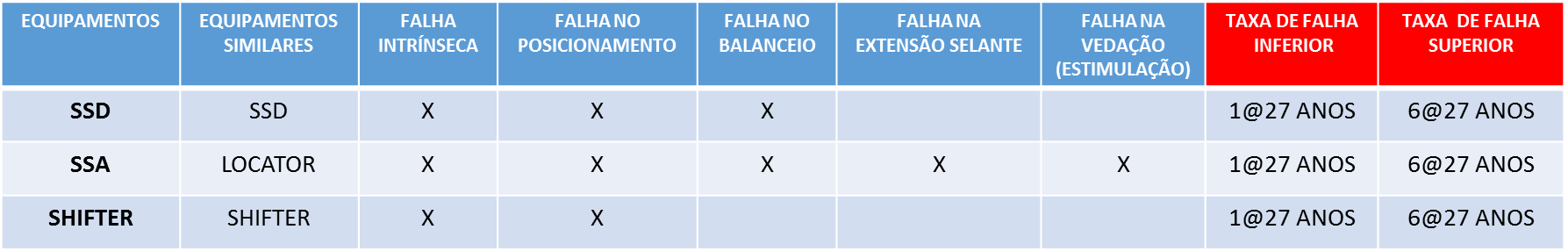
Foram então selecionados os desvios dos itens 6 a 8 e 10 a 14, na instalação, e 21 a 23, no Heavy Workover, destacados na Tabela 4.

Tabela 4: Identificação dos desvios suscetíveis à intervenção de ações de engenharia.



A Tabela 5 apresenta o detalhamento das falhas referentes aos equipamentos suscetíveis às “ações de engenharia”, considerando-se não só os critérios de definição de falhas aceitáveis nos equipamentos críticos nos poços do PPSBS a partir do número de WO durante o ciclo de vida do poço (27 anos) e a economicidade do projeto, mas também o nível de risco aceitável (ALARP).

Tabela 5: Tratamento das falhas dos equipamentos suscetíveis às ações de engenharia.



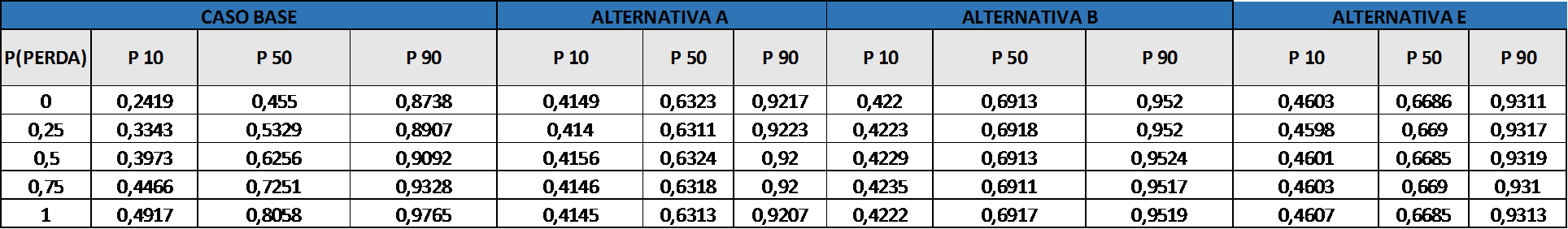
O modelo de confiabilidade mais aderente aos equipamentos mecânicos de poços é o exponencial. Considerando este modelo para o tempo de missão de 27 anos, com apenas 1 falha esperada neste intervalo, e uma confiabilidade de 95%, temos a taxa de 2,27E-07, o qual definiu-se como limite inferior. De maneira análoga, considerando-se 6 falhas no mesmo tempo de missão (27 anos) e com confiabilidade de 95%, temos uma taxa de falha associada de 1.30E-06; o que traduz um intervalo de confiança de 73,5% para apenas uma (01) em 27 anos, conforme ilustrado na Tabela 6.

Tabela6: Intervalo de confiança para 1 falha em 27 anos dos equipamentos suscetíveis às ações de engenharia.



A partir dos requisitos de engenharia definidos anteriormente (faixa de taxas de falha), os cenários foram re-simulados e obtiveram-se os novos resultados, apresentados na Tabela 7, com os cenários de probabilidade de perda e suas incertezas propagadas.

Tabela 7: Resultados com base nas falhas dos equipamentos suscetíveis às ações de engenharia.



As Figuras 16 e 17 mostram, respectivamente, as probabilidades de falha, em P50, antes e depois das ações de engenharia serem implementadas. As Figuras 18 e 19 apontam, respectivamente, as probabilidades de falha com e sem as ações de engenharia para P90. Deve-se observar que, caso essas ações não sejam tomadas, a alternativa E se apresentou como a melhor. Entretanto, após a implementação das ações (Figura 15), a alternativa A se apresentou como a melhor. Fica evidente a transladação das trajetórias de falha das alternativas A, B e E após a definição das taxas de falhas do equipamentos que afetam os desvios críticos com sensível redução das probabilidades de falha das alternativas.

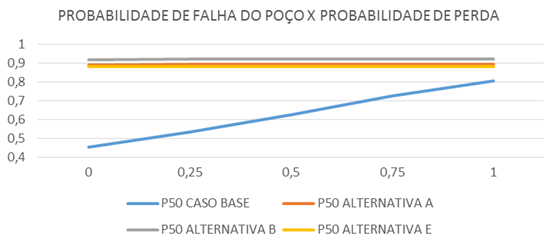


Figura 16: Probabilidades de falha antes da implantação das ações de engenharia (P50).

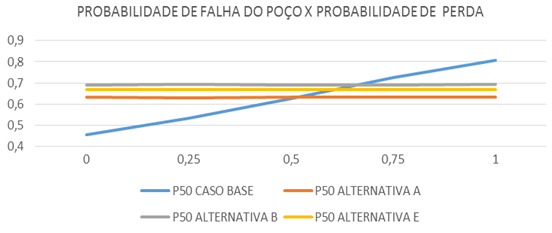


Figura 17: Probabilidades de falha após a implantação das ações de engenharia (P50).

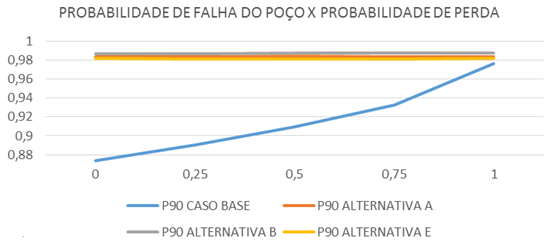


Figura 18: Probabilidades de falha antes da implantação das ações de engenharia (P90).

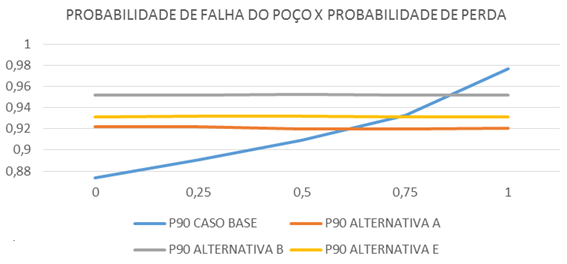


Figura 19: Probabilidades de falha após a implantação das ações de engenharia (P90).

O passo seguinte foi a realização do estudo de complexidade, a partir da escolha do cenário de maior variabilidade dos cenários re-simulados de cada alternativa e caso base e suas modelagens entrópicas.

As figuras 20 e 21 ilustram a evolução do fluxo geométrico diferencial nas variedades entrópicas e a respectiva energia aplicada até o colapso das mesmas e definição do tempo de extinção para o caso base.

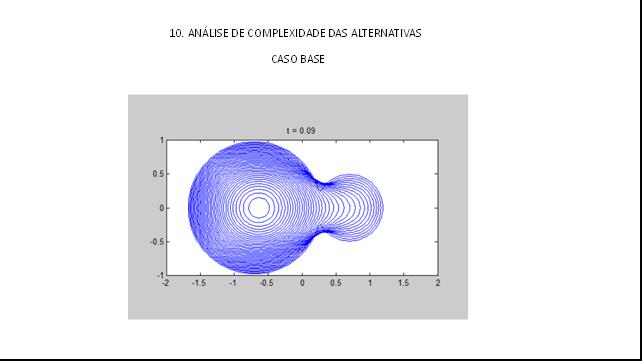


Figura 20: Colapso da variedade entrópica para o caso base.

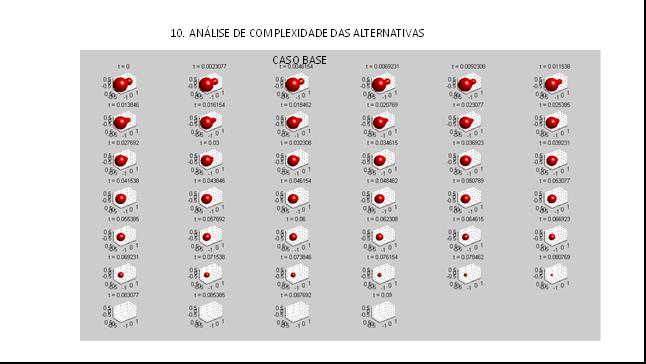


Figura 21: Tempo de extinção da variedade entrópica para o caso base.

Os resultados das análises de complexidade das alternativas podem ser observados na Tabela 8 e na Figura 22, que confirmam a mudança de “ranqueamento”. Observa-se que o caso base é o mais complexo para o cenário de alta probabilidade de perda e a Alternativa A é a que apresenta menor complexidade. Importante ressaltar a característica de indiferença aos cenários de perda, das alternativas A, B e E.

Tabela 8: Resultados das análises de complexidade por alternativa



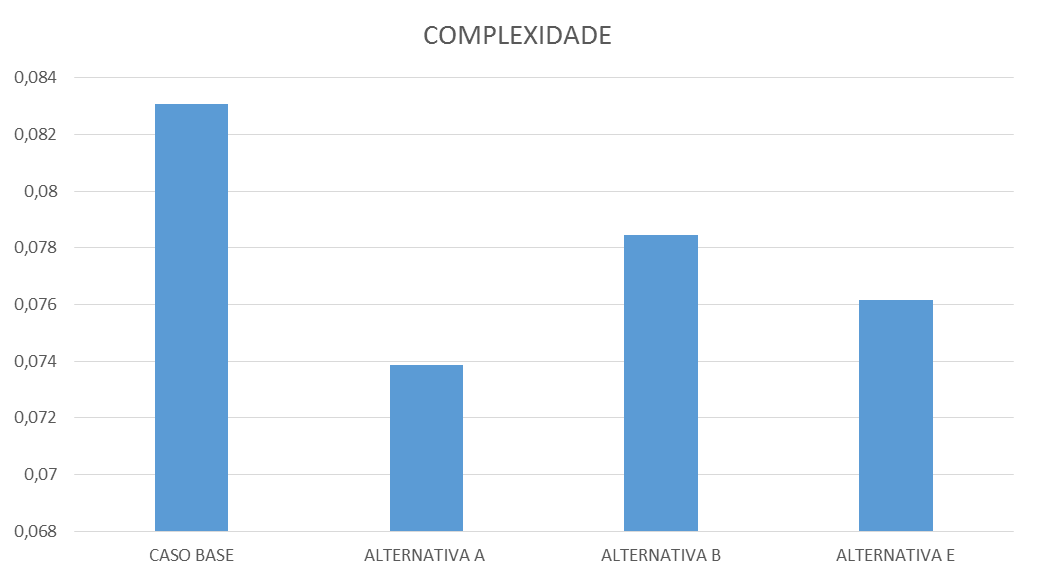


Figura 22: Resultado da análise comparativa.

1. **CONCLUSÕES**

A máxima entropia diferencial de modelos de projetos de poços se conecta com a teoria de fluxos geométricos diferenciais através da topologia, permitindo uma avaliação completa e profunda do nível de desordem associado e consequentemente, da entropia do projeto e sua complexidade final.

A combinação da máxima entropia diferencial e o fluxo geométrico diferencial possibilitou a construção de um novo modelo baseado na distribuição de energia do sistema e sua evolução em um fluxo geométrico.

Quanto maior for o grau de desordem do sistema, maiores serão as taxas de curvaturas da variedade composta e menor a velocidade do homeomorfismo, aumentando o tempo de extinção e a métrica de complexidade do projeto.

A metodologia desenvolvida possibilita a comparação entre diferentes projetos de poços e intervenções, utilizando diferentes tecnologias e processos.

Trabalhos futuros deverão focar o problema inverso, otimizando o projeto através da reversão do fluxo ou medidas neutralizadoras / suavizadoras da entropia e composição de carteira ótima de projetos.

Foram identificados os seguintes pontos de destaque na análise das alternativas propostas para a configuração PACI 3 zonas:

* Com exceção do caso base, todas as alternativas apresentam uma curva de indiferença em relação à probabilidade de perda;
* As alternativas A, B e E apresentam um elevado grau de incerteza em relação à sua confiabilidade devido à falta de conhecimento dos equipamentos utilizados, devendo-se aplicar estudos de confiabilidade nos mesmos;
* O Caso Base apresenta a menor incerteza em relação à sua disponibilidade. Porém, foi verificada maior complexidade para cenários com elevada probabilidade de perda.
* Assim, a Alternativa “A” foi a que apresentou a melhor performance (disponibilidade) em relação às demais e também o menor nível de complexidade quando se assume a aplicação das “ações de engenharia”, sendo considerada a mais adequada para a configuração PACI 3 zonas.

1. **ANEXOS**

**ENTROPIA COMO MEDIDA DE INCERTEZA**

A entropia mede a quantidade de informação faltante (ou incerteza a ser revelada) e considera a distribuição menos subjetiva compatível com as restrições dadas, ou, a menos comprometida com as incertezas faltantes.

Quando a inferência é feita basead0-se em informação incompleta (estados de incertezas das variáveis do projeto), deve-se fazê-la a partir da distribuição de probabilidades que possui a máxima entropia permitida pela informação disponível.

O Princípio da Máxima Entropia fornece uma regra de processamento ótimo das incertezas do projeto.

O princípio geral da máxima entropia é aplicável a qualquer problema com espaço de hipóteses bem definido e informação incompleta.

Na figura 23 identificamos a fonte (Natureza) como geradora e/ou potenciadora de entropia na atividade de engenharia de poços de petróleo.

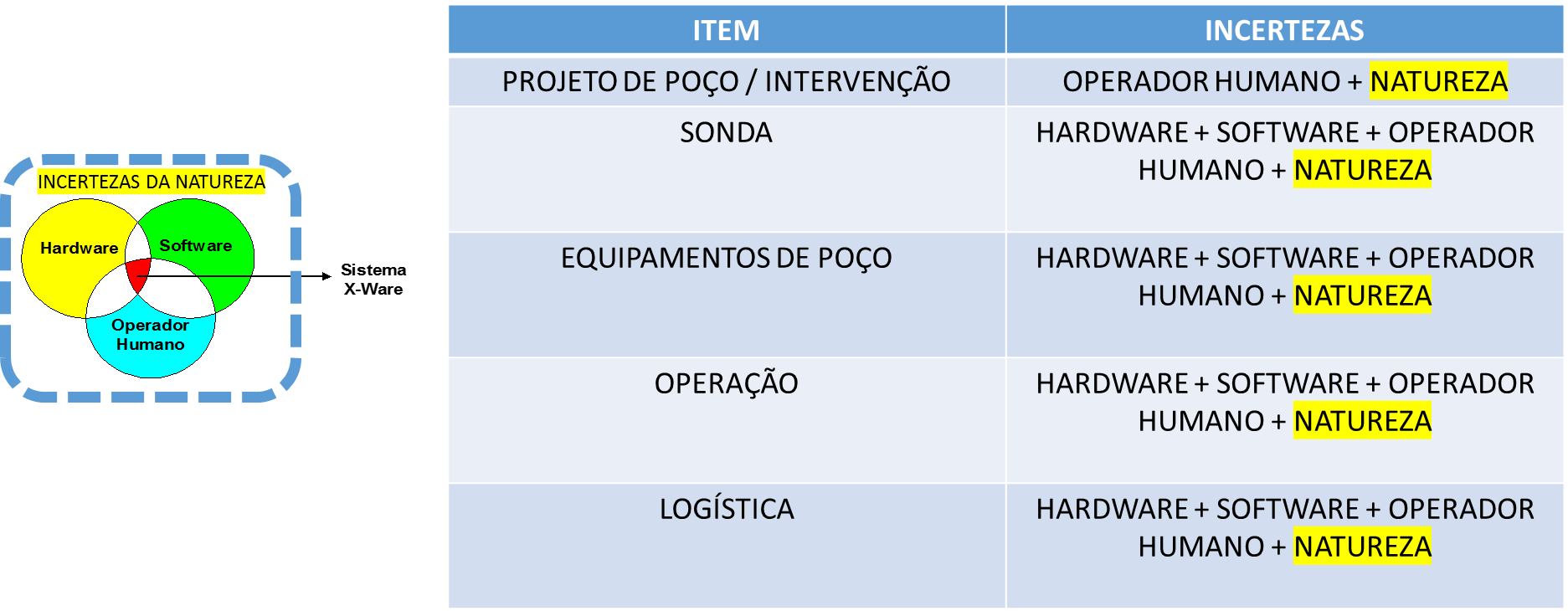


Figura 23: Metodologia desenvolvida: Fontes de entropia na atividade de engenharia de poços de petróleo

**ENTROPIA MÁXIMA DIFERENCIAL DE UMA VARIÁVEL GAUSSIANA UNIDIMENSIONAL**

O valor máximo da entropia diferencial de uma variável aleatória gaussiana unidimensional é:

Para uma determinada variância, a variável aleatória gaussiana tem a maior entropia diferencial alcançável por uma V.A.

A entropia de uma VA gaussiana X é unicamente determinada pela variância de X (isto é, é independente da média de X). Na figura 24 podemos ver a relação entre a máxima entropia e a variância.



Figura 24: Metodologia desenvolvida: Princípio da Máxima Entropia

**CONJECTURA I (REPRESENTAÇÃO TOPOLÓGICA DE UM CONJUNTO DE INCERTEZAS E MEDIDA DE ENTROPIA)**

A **conjectura I** afirma que qualquer representação do sistema em um conjunto finito de estados de um fluxo contínuo com distintos fins aleatórios, pode ser representado a partir da transformação da variável aleatória i (medida do estado final i ) em sua entropia diferencial máxima i, em uma variedade “composta” tridimensional fechada e com grupo fundamental (simplesmente conexo) trivial. O arranjo geométrico é feito a partir da união das variedades i através de cilindros de dimensão 1. Ou seja, a superfície tridimensional final da composição geométrica também irá convergir para a um simples ponto a partir do fluxo geométrico aplicado.

**CONJECTURA II (REPRESENTAÇÃO DA MEDIDA DE COMPLEXIDADE ATRAVÉS DO TEMPO DE COLAPSO DA TOPOLOGIA)**

A **conjectura II** afirma que a complexidade do sistema modelado a partir da **conjectura I** é medida pelo tempo de extinção total (colapso) da variedade (com possíveis sólitons formados) a partir da aplicação do fluxo geométrico.

**5REFERÊNCIAS**

[1] JACINTO, CARLOS MAGNO C. et al, 2009. Aspectos teóricos e metodológicos para a realização de uma análise quantitativa de risco na construção e restauração de poços. Boletim Técnico da Produção de Petróleo, PETROBRAS, Vol I, No 1.

[2] WEISBUCH, G. Complex System Dynamics. Santa Fe Institute.

[3] API 17N, 2009. Recommended Practice for Subsea Production System Reliability and Technical Risk Management.

[4] ISO 16530-1, 2007. Life cyclegovernance.