



MODELO DE CÁLCULO DE RISCO DINÂMICO APLICADO A COMPRESSORES DE GÁS

Frederico C. M. Thom

frederico.thom@petrobras.com.br

Petróleo Brasileiro AS

Edifício Unidade Administrativa da Petrobras em Vitoria, Av. Nossa Senhora da Penha, 1688, Barro Vermelho, CEP: 29057-550, Vitória, ES, Brasil

Geraldo R. Sisquini

geraldo.sisquini@ufes.br

Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, CEP: 29075-910, Vitória, ES, Brasil

Marcílio Freitas

marcilio@em.ufop.br

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas, Campus Morro do Cruzeiro, CEP: 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil

João R. B. Zoghbi Filho

joaorb@petrobras.com.br

Petróleo Brasileiro AS

Edifício Unidade Administrativa da Petrobras em Vitoria, Av. Nossa Senhora da Penha, 1688, Barro Vermelho, CEP: 29057-550, Vitória, ES, Brasil

Resumo. *O presente trabalho tem como proposta a aplicação da metodologia RBM (Risk Based Maintenance - Manutenção Baseada no Risco) em um compressor de gás, cujo cálculo do risco tem como base um modelo matemático semi-quantitativo que leva em conta a interdependência de variáveis de processo e de manutenção preditiva empregadas no processo de CBM (Condition Based Maintenance - Manutenção Baseada em Condição) do equipamento, de forma a se obter o cálculo deste risco dinâmico para fomentar ou prover a revisão da estratégia de manutenção em tempo real e de forma proativa. O risco dinâmico aplicado a sistemas envolve a interface da manutenção preditiva e das variáveis de processo com a confiabilidade estrutural e a análise de riscos. Este valor que está relacionado com os aspectos financeiros, de segurança, de pessoas e meio ambiente, é comparado ao risco tolerável de operação da planta de produção.*

Palavras-chaves: *CBM, RBM, Risco Dinâmico, Manutenção Preventiva, Compressores.*

1. INTRODUÇÃO

A gestão de ativos, atualmente orientada pela ISO 55000 (2014), recomenda o uso das estratégias de manutenção, Manutenção Baseada em Risco (*Risk Based Maintenance*, RBM) e Manutenção Baseada em Condição (*Condition Based Maintenance*, CBM), para orientar a priorização nas atividades de manutenção dos ativos de um ambiente produtivo.

2. OBJETIVO

Neste trabalho propõe-se uma estratégia de otimização de manutenção, pois se apresenta num modelo que envolve a Manutenção Baseada no Risco (RBM - *Risk Based Maintenance*) combinada com a estratégia de Manutenção Baseada em Condição (CBM - *Condition Based Maintenance*), que avaliam o risco segundo a ISO 17776 (2000), elemento direcionador de decisões proativas da manutenção e operação, obtido de forma dinâmica, baseada nas correlações e interdependências entre as taxas de falhas dos equipamentos e os alarmes das variáveis de processo no subsistema analisado, conforme ilustrado na Fig. 1.

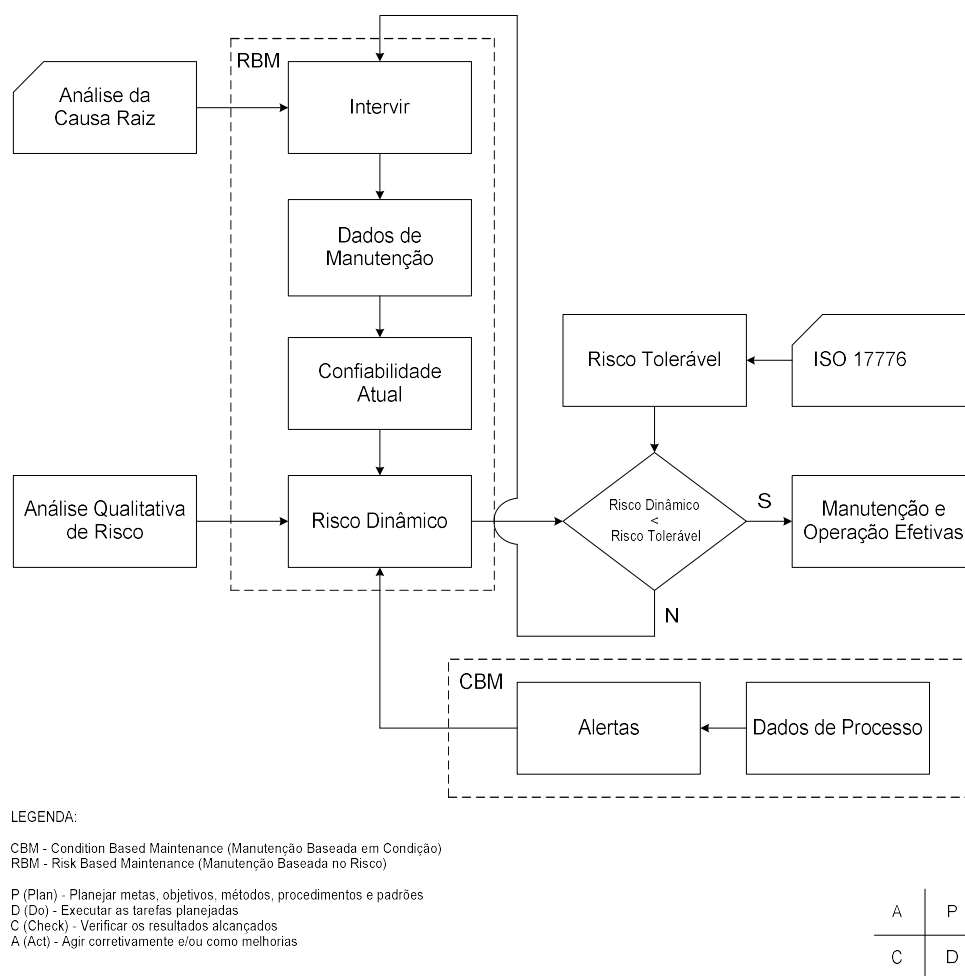


Figura 1. Avaliação do risco dinâmico.

Já os objetivos específicos são os seguintes:

a) Apresentar uma metodologia de Manutenção Baseada no Risco cuja avaliação do risco é dinâmica e baseada na condição operacional do sistema, subsistema ou equipamento;

- b) Elaborar correlações para o cálculo de risco de um sistema de compressão, considerando dados históricos de manutenção corretiva e preditiva, e de condição de processo (alarmes e intertravamentos);
- c) Implementar esta metodologia em um sistema de compressão, através do desenvolvimento de correlações para o cálculo do risco dinâmico com base na situação operacional vigente do sistema, subsistema ou equipamento;
- d) Estabelecer limites toleráveis de risco e de priorização para determinar ações de melhoria com base nos resultados vigentes de risco;
- e) Avaliar de forma qualitativa os efeitos da implementação desta metodologia na estratégia de disponibilidade vigente e os ganhos no seu aumento.

3. MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO NA MANUTENÇÃO

3.1 Manutenção baseada em condição (CBM - *Condition Based Maintenance*)

Trata-se de uma estratégia de manutenção baseada na medição da condição de ativos, para avaliar se irá falhar durante algum período futuro, e, em seguida, tomar as medidas adequadas para evitar as consequências dessa falha.

A condição dos ativos é monitorada utilizando-se uma variedade de tecnologias de objetivos, por intermédio da utilização de técnicas de controle de processos estatísticos, pelo desempenho do equipamento monitorado ou através do uso dos sentidos humanos.

A Figura 2 apresenta o esquemático de decisão na CBM.

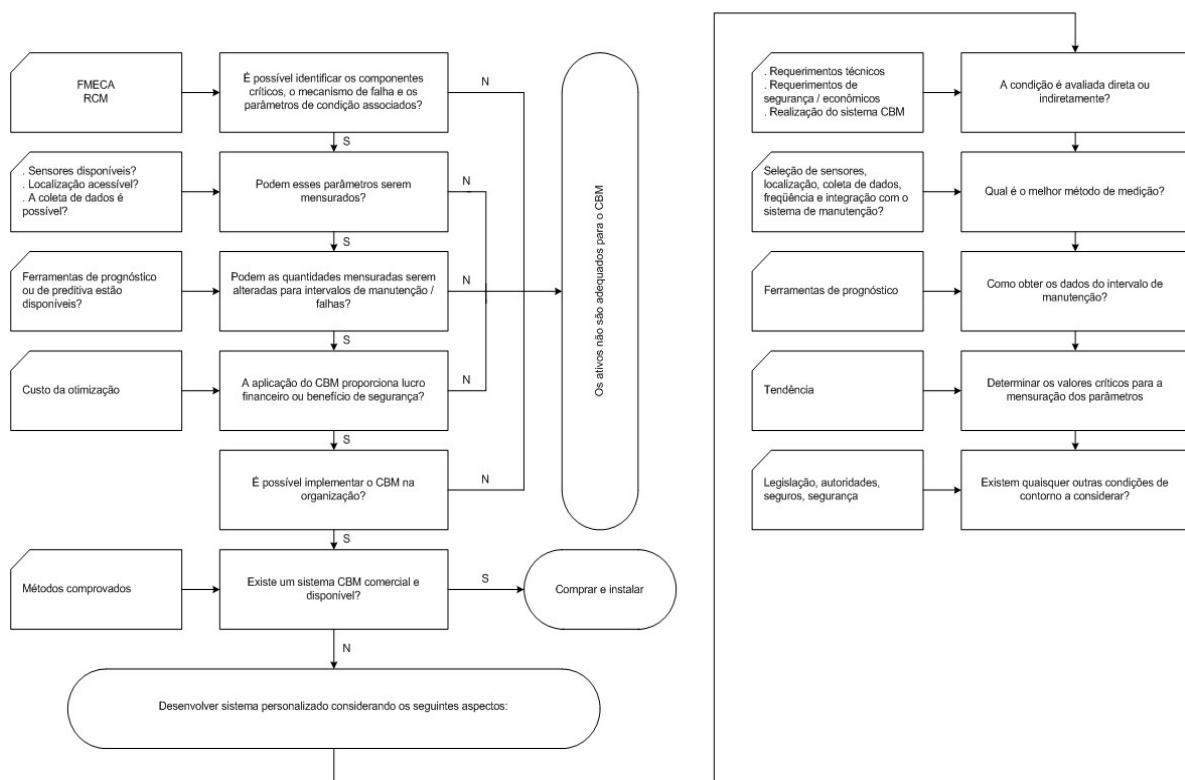


Figura 2. Esquema de decisão na CBM. Fonte: Tinga et al., 2010.

3.2 Manutenção baseada no risco (RBM - Risk Based Maintenance)

Trata-se da aplicação dos princípios de gestão de risco para as tarefas de manutenção individuais e/ ou blocos de tarefas de manutenção, utilizando-se uma matriz de risco que avalia o impacto da tarefa de manutenção obtendo-se a probabilidade de falha (PoF) e as consequências de falha (CoF) do ativo.

A manutenção é essencialmente tratada como um processo de controle de risco, onde os proprietários e gestores decidem onde dispendem mais tempo no gerenciamento através do risco em: prevenção, que é a redução da probabilidade de falha através da preservação e prevenção; e a recuperação, que consiste na redução das consequências da falha por meio de recuperação, reparos e renovações.

A RBM tende a se concentrar inicialmente em tarefas de manutenção que são essenciais para a segurança, a preservação de garantia e a prevenção de perdas. O principal objetivo desta metodologia é o de reduzir o risco global que pode resultar como consequência de falhas inesperadas em instalações operacionais (Khan & Haddara, 2004). A inspeção e atividades de manutenção são priorizadas com base na quantificação do risco causada devido à falha de um dos componentes, de modo que a soma do risco pode ser minimizada utilizando-se a manutenção baseada no risco. Os componentes de alto risco são inspecionados e mantidos com maior frequência e profundidade, visando alcançar critérios de risco toleráveis (Brown & May, 2003).

A Figura 3 ilustra um diagrama de fluxo do processo utilizado para desenvolver esta metodologia.

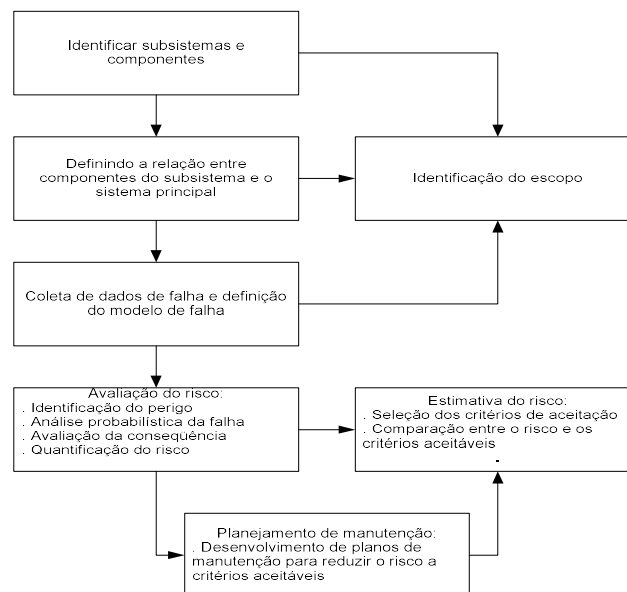


Figura 3. Arquitetura da metodologia RBM. Fonte: Khan & Haddara, 2003.

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Desenvolvimento do modelo

4.1.1 Definição do escopo

O modelo matemático do cálculo do risco dinâmico utilizará como base de dados o histórico de falhas e de dados de processo (instrumentos), relatórios de manutenção preditiva ligados à ferrografia e à análise de vibrações, para um sistema de compressão de gás de uma planta de tratamento de gás natural, entre os anos de 2011 e 2014.

O ciclo de operação do sistema de compressão durante esse período está demonstrado na Fig. 4, onde é importante informar que conforme o gráfico, os dados do conjunto A foram descartados, pois seu histórico demonstra que o mesmo apresenta falhas de fabricação e comissionamento e também constante indisponibilidade. Portanto, não será feito o cálculo do risco neste equipamento.

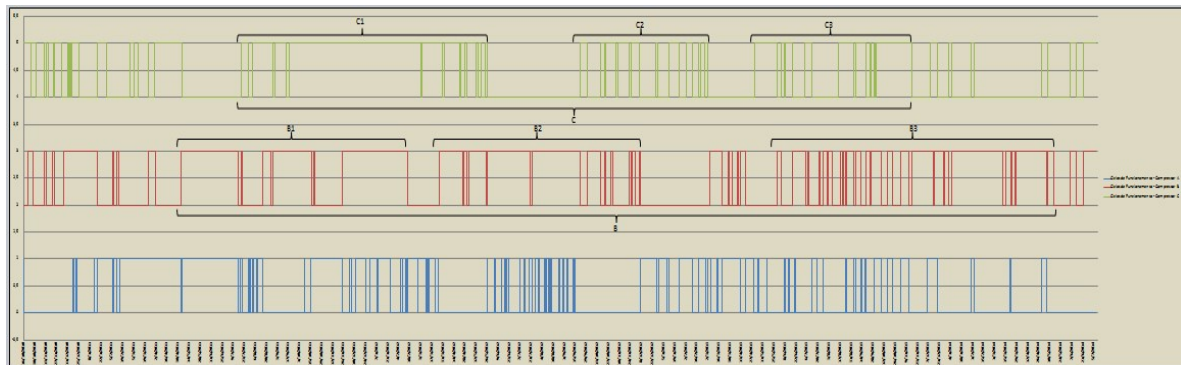


Figura 4. Ciclos de operação individualizados do conjunto motor-compressor.

A Tabela 1 a seguir apresenta os resultados encontrados para o MTBF, MTTR e de Disponibilidade para a performance dos moto-compressores.

Tabela 1. Valores de MTBF, MTTR e Disponibilidade dos moto-compressores

		Moto-compressor A	Moto-compressor B	Moto-compressor C
MTBF	dias	11,875	17,047	15,436
MTTR	dias	28,808	17,308	21,222
Disponibilidade	%	29,2	49,6	42,1

Segue para conhecimento os dados de Weibull dos 3 conjuntos (A, B e C) no período global de estudo, 2011 a 2014, e que estão demonstrados na Tabela 2:

Tabela 2. Dados de Weibull dos 3 moto-compressores para o período 2011 a 2014

Período 2011-2014 (global)					
Conjunto \ Parâmetros	β	η	R^2	Quantidade de Falhas	Quantidade de Inspeções
A	1,420082	1104,695	0,989105	101	105
B	1,714006	1114,09	0,992425	94	107
C	1,794648	1090,67	0,981279	104	108

4.1.2 Hierarquização do escopo

Para demonstrar a hierarquização dos dados de manutenção e processo, adotou-se a hierarquização dos componentes por FTA (*Failure Tree Analysis* - Análise de Árvore de Falhas) baseada na taxonomia padrão da norma ABNT NBR ISO 14224 (2011) para um sistema de moto compressão.

4.1.3 Cálculo da probabilidade de falha (PoF)

Os eventos básicos, identificados por círculos na FTA no último subnível, foram considerados especificamente neste trabalho, para o número de falhas igual ou superior a quatro. Esta seleção se fez necessária para viabilizar a regressão dos dados de falha utilizando a distribuição Weibull, que demanda experimentalmente pelo menos quatro eventos de falha.

As falhas foram levantadas e categorizadas para representar o agrupamento do histórico de falhas por equipamentos para o compressor e para o motor a gás, no sistema de compressão, classificando pelos modos de falha previstos no OREDA (2002).

Assim sendo, na Figura 5, a seguir, ilustra a FTA considerada válida do moto-compressores B para o estudo de caso analisado.

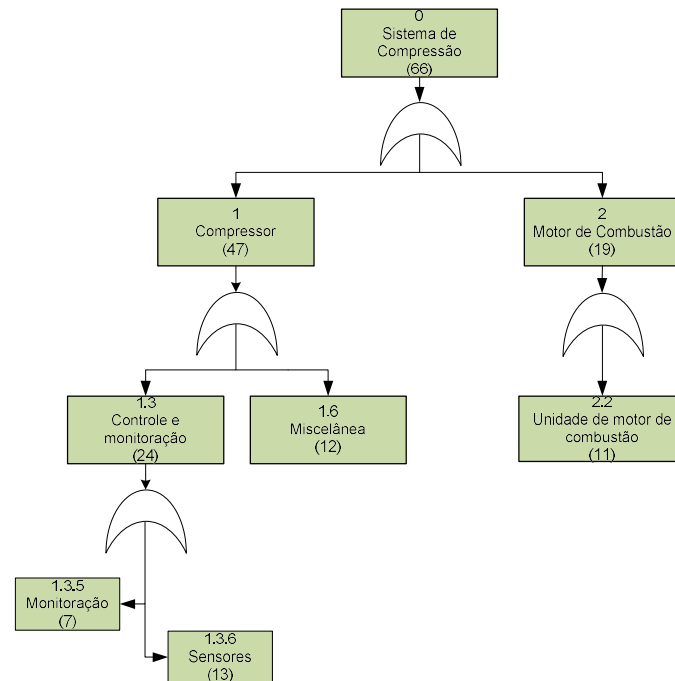


Figura 5. FTA do moto-compressor B para os períodos de operação B1, B2 e B3.

Baseadas nas FTA's de cada período de operação, procurou-se gerar os resultados numéricos dos parâmetros η e β , de acordo com os dados de manutenção regredidos pela distribuição Weibull, através do *software* da ReliaSoft na versão Weibull++9 utilizando-se o método de máxima verossimilhança (MLE).

O método MLE foi adotado pois este estudo de caso apresenta bancos de dados com variados tipos de informações, com alta quantidade de dados de tempos até falhas e de tempos até inspeções.

Assim sendo, calcula-se os valores da probabilidade de falha, PoF, utilizando a correlação de Weibull para cada componente no sistema de compressão até o nível obtido a partir da regressão dos dados históricos de manutenção, considerando a sequência dos intervalos de tempo, em que o grupo de equipamentos operou sem tempos mortos.

$$PoF(t) = \sum [PoF_{i,j,k}(t)] \quad (1)$$

4.1.4 Cálculo da consequência de falha (CoF)

A consequência de falha é obtida através de método semi-quantitativo. Na categorização da consequência da falha, foi utilizada a norma da Petrobras PG-1E1-00425-0 (2009), que é aplicada a dutos, como referência para este trabalho.

O detalhamento empírico do valor dos fatores, que é de acordo com o grau de criticidade do aspecto ou da descrição, é apresentado na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3. Categorização da consequência da falha

Índice de Consequência de Falha CoF	Aspecto / Descrição		Fator	Peso Equivalente
VI	Segurança	Trecho de duto junto a uma instalação ou área densamente habitada, onde acidentes associados ao seu conteúdo, volume e posição, podem levar à ocorrência súbita de fogo / explosão / intoxicação, com potencial de causar múltiplas fatalidades à população rotineiramente presente, ou local com classe de locação IV.	10	alto
	Meio-ambiente	Vazamentos podem causar danos severos em uma região de mananciais para abastecimento, incluindo áreas sensíveis.		
	Perda de produção	Superior a 25% da produção diária de uma Unidade de Negócios.		
V	Segurança	Trecho de duto junto a uma instalação ou área habitada, onde acidentes associados ao seu conteúdo, volume e posição, podem levar à ocorrência de fogo / explosão / intoxicação, com potencial de causar lesões graves ou possíveis fatalidades a um grupo restrito de pessoas, ou local com classe de locação III.	5	médio
	Meio-ambiente	Vazamentos podem causar danos severos em mais de uma área de mananciais para abastecimento.		
	Perda de produção	Entre 10% e 25% da produção diária de uma Unidade de Negócios.		
IV	Segurança	Trecho de duto junto a uma instalação ou área habitada, onde acidentes associados ao seu conteúdo, volume e posição, podem causar lesões de gravidade moderada à população presente, ou local com classe de locação II.	5	médio
	Meio-ambiente	Vazamentos podem causar danos severos em uma área restrita.		
	Perda de produção	Entre 5% e 10% da produção diária de uma Unidade de Negócios.		
III	Segurança	Trecho de duto próximo de uma instalação ou área habitada, onde eventuais acidentes, podem causar lesões leves às pessoas da instalação ou área habitada, mas que não atinge a classe de locação II.	1	baixo
	Meio-ambiente	Vazamentos podem causar danos moderados em uma área restrita.		
	Perda de produção	Entre 1% e 5% da produção diária de uma Unidade de Negócios.		
II	Segurança	Trecho de duto próximo de uma instalação ou de área habitada, onde, a partir de eventuais acidentes, não seriam esperadas lesões ou, no máximo, casos de primeiros socorros (sem afastamento) ou local com classe de locação I.	1	baixo
	Meio-ambiente	Vazamentos podem causar danos leves ou insignificantes em uma área restrita.		
	Perda de produção	Entre 0,1% e 1% da produção diária de uma Unidade de Negócios.		
I	Segurança	Trecho de duto distante de uma instalação, onde eventuais acidentes não teriam qualquer impacto às pessoas das instalações mais próximas ou pessoas de uma área habitada.	1	baixo
	Meio-ambiente	Vazamentos não teriam repercussão ambiental mensurável.		
	Perda de produção	Inferior a 0,1% da produção diária de uma Unidade de Negócios.		

Fonte: PG-1E1-00425-0, 2009.

4.1.4.1 Avaliação do CoF

Os modos de falha são selecionados qualitativamente o que contribui direta e indiretamente para o desarme da máquina, risco de segurança ou pessoas (críticos).

Desta forma, baseado nos critérios da Tabela 3, adotou-se que no caso do efeito não operacional apresentar um peso alto para o modo de falha respectivo, o seu valor será 10, no caso de um peso médio será 5, e finalmente no caso de um evento baixo será 1.

Ou seja, o valor numérico do $CoF_{i,j,k}$ será o maior valor de referência para os efeitos não operacionais relativos a segurança, meio ambiente e impacto financeiro (lucro cessante), assim como, para o estabelecimento do $CoF_{i,j,k}$ no equipamento quando temos mais de um modo de falha, o valor numérico a ser considerado também será o de maior valor.

4.1.5 Cálculo do risco

$$Risco_{i,j,k}(t) = PoF_{i,j,k}(t) \cdot CoF_{i,j,k} \quad (2)$$

Quando se calcula o risco no tempo, os dados censurados devem ser retirados, ou seja, os períodos de medição e verificação no número de falhas, alarmes, intertravamentos e de eventos de manutenção preventiva, são representativos quando se desconsidera os tempos mortos de funcionamento das unidades de compressão.

No cálculo do risco dinâmico, considerou-se um efeito intensificador de variáveis diferentes ligadas ao risco de falhas, ou seja, o risco é atualizado.

4.1.5.1 Intensificadores

Tratam-se das variáveis relacionadas às não conformidades do desempenho do equipamento e à instabilidade do processo, que provocam os ajustes que influenciam o risco dinâmico.

4.1.5.1.1 Intensificador do evento de falha

Os dados de eventos de falha são oriundos do sistema SAP R3. Eles são indexados pelos componentes i, j, k da FTA; estes dados influenciam os cálculos dos parâmetros η e β da função Weibull.

4.1.5.1.2 Fator intensificador do evento de alarme

Os dados de eventos de alarmes foram obtidos do PI, que é o *software* do *Plant Information*, onde contempla todas as informações de operação momentânea dos sistemas da planta de processo na unidade de tratamento de gás. Os alarmes dos instrumentos que monitoram os moto-compressores são considerados como indicadores de instabilidade de processo, problemas de manutenção e de falhas futuras, sendo calculadas as intensidades dos alarmes como um fator intensificador do risco dinâmico. Os alarmes dos instrumentos podem ter patamares classificados em limite superior (H) e limite inferior (L). Assim como em intertravamento com limite superior (HH) e intertravamento com limite inferior (LL).

Exemplo: O gráfico abaixo mostra uma seleção dos valores indicados no PI para o PIT-1231607A, onde pode-se observar os valores de *set* do alarme de H, L, HH e LL.

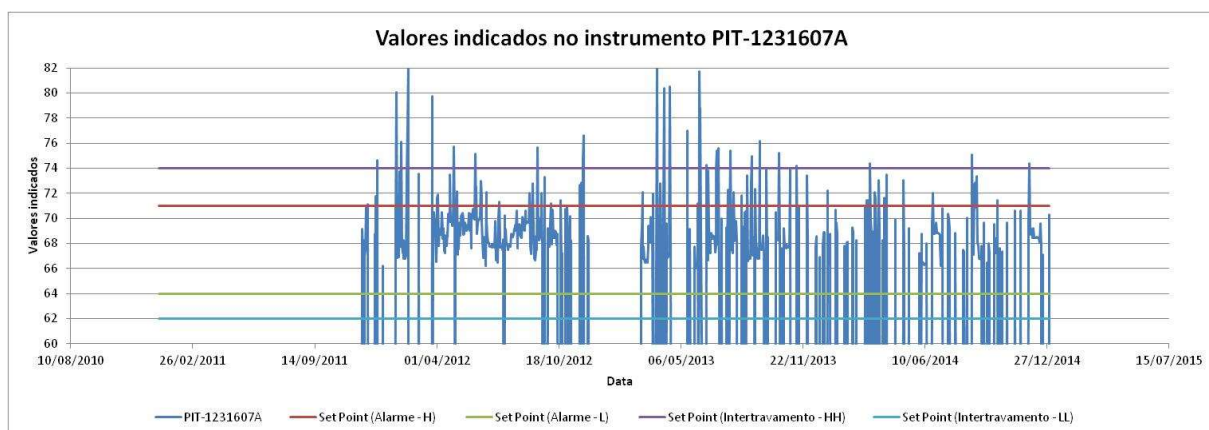


Figura 6. Valores indicados no instrumento PIT-1231607A.

Tabela 4.- Condicionantes para os limites de alarmes

		VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO	CONDICIONANTE	OBSERVAÇÕES
LIMITES SUPERIORES	$I_A = \left(\frac{REAL}{SET_H} \right)$	$I_{A,j,k} = I_A$		$I_A > 1$ e $SET_H \leq REAL < SET_{HH}$	para instrumentos sujeitos a intertravamentos, ou seja, o instrumento alarmou pois o valor medido ultrapassou o SET_H . Este critério só vale para os limites superiores de H
			$I_{A,j,k} = 1$	$I_A \leq 1$	o instrumento não alarmou pois o valor medido não atingiu o SET_H ; este critério só vale para os limites superiores de H
		VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO	CONDICIONANTE	OBSERVAÇÕES
LIMITES INFERIORES	$I_A = \left(\frac{SET_L}{REAL} \right)$	$I_{A,j,k} = I_A$		$I_A > 1$ e $SET_{LL} < REAL \leq SET_L$	para instrumentos sujeitos a intertravamentos, ou seja, o instrumento alarmou pois o valor medido ultrapassou o SET_L . Este critério só vale para os limites inferiores de L
			$I_{A,j,k} = 1$	$I_A \leq 1$	o instrumento não alarmou pois o valor medido não atingiu o SET_L . Este critério só vale para os limites inferiores de L

A seguir temos a Tabela 5 como exemplificativa para o período escolhido aleatoriamente.

Tabela 5. Valores numéricos do intensificador de alarmes obtidos no PIT-1231607A

Data	Valor indicado	SET_H	SET_L	$I_A = \left(\frac{REAL}{SET_H} \right)$	$\left(\frac{REAL}{SET_H} \right) \leq 1 \Rightarrow 1$	$I_A = \left(\frac{SET_L}{REAL} \right)$	$\left(\frac{SET_L}{REAL} \right) \leq 1 \Rightarrow 1$
01/04/2012	69.18	71	64	0.97	1.00	sem efeito	sem efeito
02/04/2012	71.62	71	64	1.0087	1.0087	sem efeito	sem efeito
03/04/2012	71.99	71	64	1.0125	1.0125	sem efeito	sem efeito
04/04/2012	67.78	71	64	0.9546	1	sem efeito	sem efeito
...	...	...	...	...	...	...	...
22/04/2012	70.8	71	64	0.9972	1	sem efeito	sem efeito
23/04/2012	73.5	71	64	1.0352	1.0352	sem efeito	sem efeito
24/04/2012	69.73	71	64	0.9821	1	sem efeito	sem efeito
...	...	...	...	...	...	...	...
28/04/2012	70.2	71	64	0.9887	1	sem efeito	sem efeito
29/04/2012	73.18	71	64	1.0307	1.0307	sem efeito	sem efeito
30/04/2012	70.43	71	64	0.992	1	sem efeito	sem efeito
...	...	...	...	...	...	...	...
03/05/2012	67.94	71	64	0.9569	1	sem efeito	sem efeito
04/05/2012	72.17	71	64	1.0165	1.0165	sem efeito	sem efeito
05/05/2012	67.1	71	64	0.9451	1	sem efeito	sem efeito

4.1.5.1.3 Fator intensificador do evento de intertravamento

Os dados de eventos de intertravamentos são oriundos do PI, que é o *software* do *Plant Information*, onde contempla todas as informações de operação *on line* dos sistemas da planta de processo na unidade de tratamento de gás.

Os alarmes dos instrumentos que monitoram os moto-compressores são considerados como indicadores de instabilidade de processo, problemas de manutenção e de falhas futuras, sendo calculadas as intensidades dos intertravamentos como um fator intensificador do risco dinâmico.

Os intertravamentos relacionados aos limites inferiores (LL) não foram considerados neste estudo, devido a impossibilidade de se retirar os casos em que houve desligamento da máquina, desligamento do instrumento ou *by-pass (reset)* executado pelo operador.

Tabela 6. Condicionantes para os limites de intertravamentos

		VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO	CONDICIONANTE	OBSERVAÇÕES
LIMITES SUPERIORES	$I_I = \left(\frac{REAL}{SET_{HH}} \right)$	$I_{I,j,k} = I_I$		$I_I > 1$	o instrumento atuou pois o valor medido ultrapassou o SET_{HH} . Este critério só vale para os limites superiores de HH
			$I_{I,j,k} = 1$	$I_I \leq 1$	o instrumento não atuou pois o valor medido não atingiu o SET_{HH} . Este critério só vale para os limites superiores de HH

A seguir tem-se como exemplo o gráfico dos valores calculados em relação ao intertravamento do instrumento; obtenção do I_I e condicionantes no instrumento PIT-1231607A.



Figura 7. Valores calculados para intertravamento no instrumento PIT-1231607A.

A seguir mostramos a Tabela 7 como exemplificativa para o período escolhido ao acaso.

Tabela 7. Valores numéricos do intensificador de intertravamentos obtidos no PIT-1231607A

Data	Valor indicado	SET _{HH}	SET _{LL}	$I_I = \left(\frac{REAL}{SET_{HH}} \right)$	$\left(\frac{REAL}{SET_{HH}} \right) \leq 1 \Rightarrow 1$
30/01/2012	66,91	74	62	0,904	1
31/01/2012	73,73	74	62	0,996	1
01/02/2012	67,79	74	62	0,916	1
02/02/2012	67,77	74	62	0,916	1
03/02/2012	76,09	74	62	1,0282	1,0282
04/02/2012	67,74	74	62	0,915	1
...	...	...	...	...	...
11/02/2012	67,11	74	62	0,907	1
12/02/2012	73,65	74	62	0,995	1
13/02/2012	77,37	74	62	1,0455	1,0455
14/02/2012	82,5	74	62	1,1149	1,1149
15/02/2012	0,05	74	62	sem efeito	sem efeito

4.1.5.1.4 Fator intensificador do evento de não conformidade na manutenção preditiva

A manutenção preditiva do sistema de compressão deste estudo de caso é baseada em análises de ferrografia e de vibrações.

Neste estudo de caso considerou-se que o momento do evento de manutenção preditiva que sinaliza uma ação por alerta, elevado ou perigo contabilizando a taxa λ_{nc} .

Os relatórios de preditiva que apresentam resultados de acordo com a normalidade do processo não são utilizados como intensificador do risco dinâmico. Por outro lado, apenas os relatórios que mostram alguma inconformidade são considerados no cálculo do fator intensificador, pois eles são indicadores de instabilidade de processo, problemas de manutenção e de falhas futuras.

Exemplo: Para o fator intensificador de evento de não conformidade, apresentamos o gráfico do fator ($\lambda_{nc} + 1$) do moto-compressor B, no período B1.

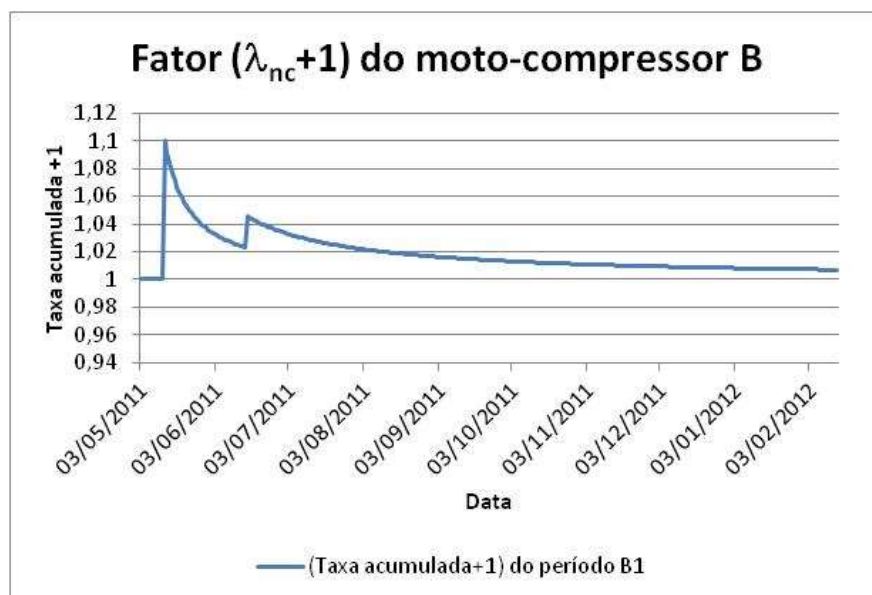


Figura 8. Fator ($\lambda_{nc} + 1$) do moto-compressor B no período B1.

A Tabela 8 é exemplificativa do gráfico acima.

Tabela 8. Valores numéricos do intensificador do evento de não conformidade na manutenção preditiva

Data	Quantidade acumulada	Taxa acumulada (quantidade acumulada/ tempo)	Taxa acumulada +1
03/05/2011	0	0	1
12/05/2011	0	0	1
13/05/2011	1	0,1	1,1
14/05/2011	1	0,090909	1,090909
...			
15/06/2011	1	0,023256	1,023256
16/06/2011	2	0,045455	1,045455
17/06/2011	2	0,044444	1,044444
...			
14/02/2012	2	0,006969	1,006969

4.2 Tratamento dos dados

4.2.1. Cálculo do risco dinâmico

$$Risco_{i,j,k}(t) = \sum [PoF_{i,j,k}(t).CoF_{i,j,k}] \quad (3)$$

logo, é uma equação que depende dos valores dos parâmetros η e β da Weibull e do tempo t .

Como os modos de falha diferentes influenciam a indicação de alarme do instrumento, altera-se o CoF na mudança do sintoma ou da consequência, e sabendo-se que $\lambda_{i,j,k}(t)$ é o intensificador de manutenção preditiva (λ_{nc}), e o $CoF_{i,j,k}$ assume o valor do CoF para o cenário de consequência associado ao modo de falhas e componente relacionado.

É importante acrescentar que o cálculo do risco é um produtivo, pois demonstra que com o incremento dos intensificadores o risco dinâmico é intensificado. Assim sendo,

$$Risco_{dinâmico}(t) = Risco_{i,j,k}(t).F_S = \sum_i \left(\sum_j \left\{ \sum_k [PoF_{i,j,k}(t).CoF_{i,j,k} \cdot (\lambda_{nc} + 1)_{i,j,k} \cdot I_{A_{i,j,k}}] I_{A_{i,j}} \right\} \cdot I_{A_i} \right) \cdot I_{I_{i,j,k}} \cdot F_S \quad (4)$$

onde $\lambda_{nc} = 0$ quando não houver o evento de manutenção preditiva num equipamento que apresentou falhas.

O fator de correção do risco dinâmico é obtido de forma relativa em função do valor máximo do risco não tolerável (discutido no item 6.3), conforme a expressão a seguir:

$$F_S = \frac{10}{R_{máx}} \quad (5)$$

4.2.1.1 Regressão de dados de manutenção

A regressão de dados de manutenção utilizada neste estudo de caso consiste na obtenção da probabilidade de falha, $PoF(t)$, e da taxa de não conformidades de preditivas, λ_{nc} , de acordo com as seguintes metodologias:

A Figura 9 mostra a metodologia numérica empregada para o cálculo do $PoF(t)$.

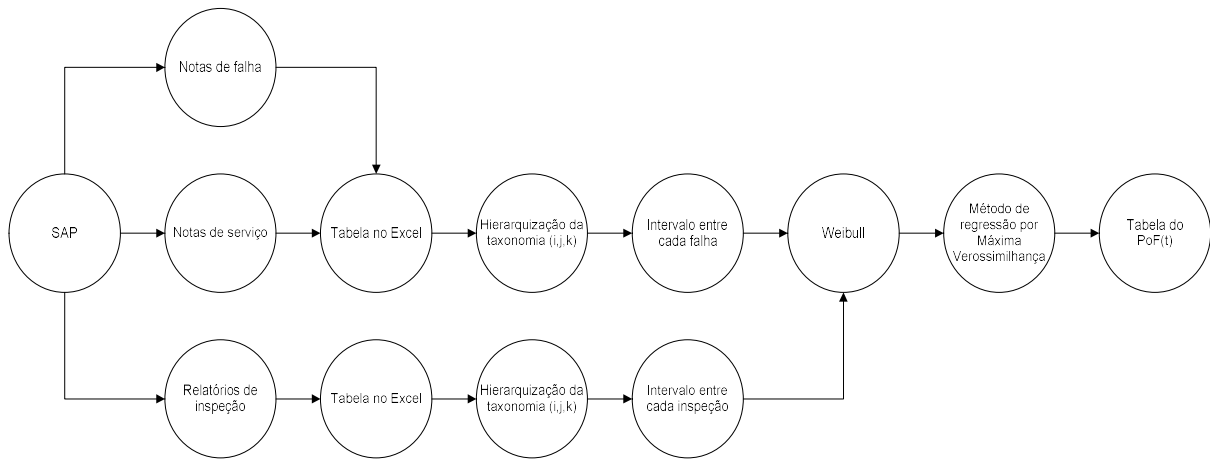


Figura 9. Metodologia numérica para a obtenção do $PoF(t)$.

Já a Figura 10 mostra a metodologia numérica empregada para o cálculo do λ_{nc} . A taxa de não conformidades é calculada através da razão entre a quantidade acumulada de não conformidades e o tempo decorrido até o evento de preditiva.

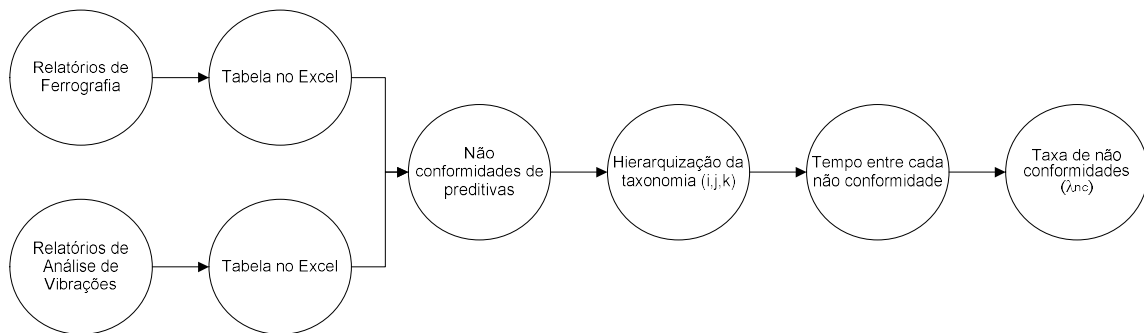


Figura 10. Metodologia numérica para a obtenção do λ_{nc} .

4.2.1.2 Regressão de dados de processo

A regressão de dados de processo utilizada neste estudo de caso consiste na obtenção dos intensificadores para alarmes, I_A , e dos intensificadores para intertravamentos, I_I , de acordo com a seguinte metodologia:

A Figura 11 mostra a metodologia numérica empregada para o cálculo do I_A e I_I .

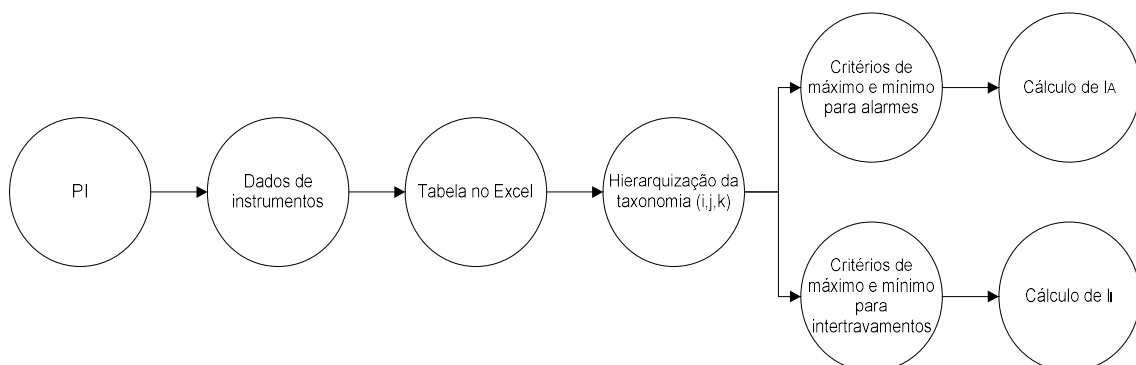


Figura 11. Metodologia numérica para a obtenção do I_A e I_I .

4.3 Risco tolerável

Adotou-se a Tabela 9 a seguir, que é baseada na ISO 17776 (2000), para se avaliar a tolerabilidade do risco em termos gerais.

Sendo que a classificação de severidade da *CoF* e a faixa de valores do *PoF* são baseados e adaptados da PG-1E1-00425-0 (2009), assim como, a falha no conhecimento dos critérios de ações de bloqueio, significa os riscos não toleráveis do sistema.

Assim sendo, pelo exposto, a faixa de risco não tolerável compreende os valores de 3,6 a 10 (trata-se da região identificada pela cor vermelha).

Tabela 9. Risco tolerável em termos gerais

Consequência (CoF)					Probabilidade de falha (PoF)	Grau de risco tolerável			
Classificação de severidade	Pessoas	Ativos	Meio ambiente	Reputação	Faixas de valores (%)	A	B	C	D
						Ocorreu na indústria do E&P	Ocorreu na operação da companhia	Ocorrido muitas vezes no ano durante a operação da companhia	Ocorrido muitas vezes no ano na mesma localidade
1	Sem lesão	Sem dano	Sem efeito	Sem impacto	0 a 15				
2	Lesão leve	Dano leve	Efeito leve	Impacto leve	16 a 30				
4	Lesão limitada	Dano limitado	Efeito limitado	Impacto limitado	31 a 45				
6	Lesão maior	Dano local	Efeito local	Impacto considerável	46 a 60				
8	Uma fatalidade	Dano maior	Efeito maior	Maior impacto nacional	61 a 80				
10	Múltiplas fatalidades	Dano extensivo	Efeito maciço	Maior impacto internacional	81 a 100				

Legenda:

Gerenciar por melhoria contínua		Incorporar medidas para a redução do risco		Falha no conhecimento dos critérios de blindagem	
---------------------------------	--	--	--	--	--

Fonte: ISO 17776:2000.

4.4 Modelagem matemática

Para efeito numérico, o risco dinâmico é obtido na taxonomia i, j, k do terceiro nível da FTA, e em seguida comparado com a faixa de risco não tolerável, desta forma, demonstrando matematicamente se a estratégia de manutenção adotada foi efetiva. Caso contrário, a metodologia deve ser revista.

Assim sendo, tanto o cálculo do $PoF(t)$ quanto o do risco dinâmico de uma taxonomia considerada, é realizado como uma média ponderada dos níveis inferiores a essa taxonomia, desde que esses níveis apresentem a quantidade de falhas maior ou igual a 4 dentro do período.

A título de exemplo, na Fig. 12 a seguir apresenta-se os cálculos do risco dinâmico do período B1, onde o risco da taxonomia 1.3 é dado pela taxonomia 1.3.6, pois foi o único nível inferior que apresentou $PoF(t)$. Em seguida, o risco da taxonomia 1 é a média dos riscos das taxonomias 1.3 e 1.6. Finalmente, o risco do sistema, no nível 0, é a média das taxonomias 1 e 2, ou seja, o cálculo do risco dinâmico no período B1 fica como:

$$R_0 = (R_{1.3.6} + R_{1.6} + 2.R_2)/4 \quad (6)$$

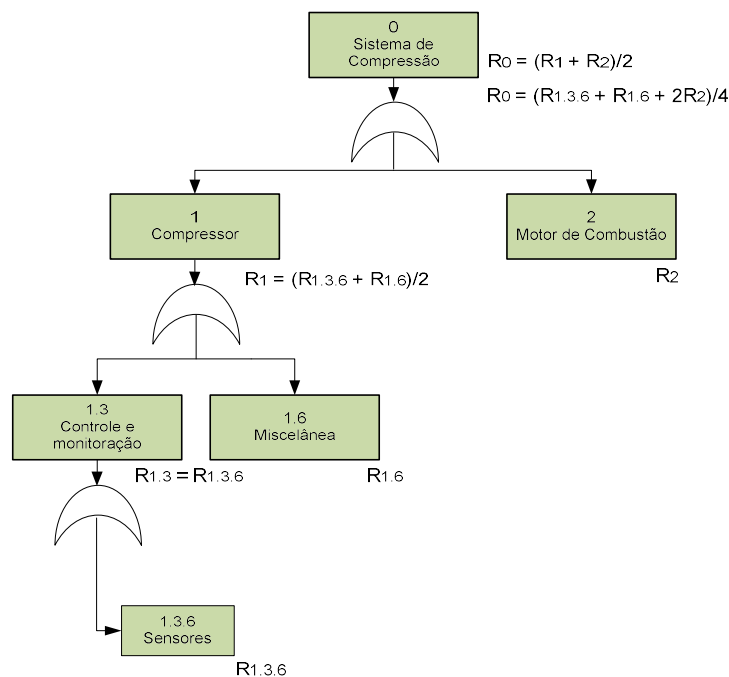


Figura 12. Algebrismo no cálculo do risco dinâmico do período B1 de acordo com as taxonomias.

5. RESULTADOS

5.1 Probabilidade de falha

Foi desenvolvida a Tabela 10 a seguir, que apresenta os resultados numéricos dos parâmetros de Weibull do $PoF(t)$, por período de operação, como o exemplo do conjunto moto-compressor B.

Tabela 10. Parâmetros de Weibull do $PoF(t)$ por período de operação do conjunto moto-compressor B

Conjunto moto-compressor B - Por período de operação									
Ciclos de operação	Taxonomia	0	1	1.3	1.3.5	1.3.6	1.6	2	2.2
B1 (03/05/2011 - 14/02/2012)	β	3,6668	3,8803	2,4671	-	1,8239	3,3193	1,6554	-
	η	207,4	201,28	219,38	-	190,09	221,32	306,19	-
	R^2	0,9424	0,9054	0,9639	-	0,9824	0,996	0,9138	-
	Qnt. de Falhas	21	17	8	2	5	5	4	1
	Qnt. de Inspeções	24	12	10	9	1	2	7	0
B2 (26/03/2012 - 06/12/2012)	β	1,9009	1,5972	1,8023	1,0383	2,9628	-	2,5295	1,9248
	η	191,36	163,76	149,74	180,73	191,35	-	221,93	182,49
	R^2	0,9855	0,9699	0,9436	0,9807	0,9999	-	0,9798	0,9881
	Qnt. de Falhas	26	19	12	4	5	3	7	6
	Qnt. de Inspeções	19	6	2	2	1	1	10	1
B3 (28/05/2013 - 14/05/2014)	β	1,8534	3,028	3,8899	-	-	2,4531	1,0426	0,5342
	η	318,87	272,54	296,27	-	-	297,82	378,51	230,89
	R^2	0,9838	0,9637	0,9987	-	-	0,9506	0,9718	0,8855
	Qnt. de Falhas	19	11	4	1	3	4	8	4
	Qnt. de Inspeções	36	19	14	4	3	4	11	2

De maneira análoga, o $PoF(t)$ também é o somatório das probabilidades de falha, que é realizado através das taxonomias dos níveis inferiores do estudo de caso, ou seja:

$$PoF_{i,j,k}(t) = \sum [PoF_{i,j,k}(t)] \quad (7)$$

Assim, o $PoF(t)$ do nível 0 do moto-compressor B foi calculado pelas Equações (8), (9) e (10), referentes aos períodos B1, B2 e B3, respectivamente.

$$PoF_0(t) = [PoF_{1.3.6}(t) + PoF_{1.6}(t) + 2.PoF_2(t)] \cdot \frac{1}{4} \quad (8)$$

$$PoF_0(t) = [PoF_{1.3.5}(t) + PoF_{1.3.6}(t) + 2.PoF_{2.2}(t)] \cdot \frac{1}{4} \quad (9)$$

$$PoF_0(t) = [PoF_{1.3}(t) + PoF_{1.6}(t) + 2.PoF_{2.2}(t)] \cdot \frac{1}{4} \quad (10)$$

Dessa forma, a Fig. 13 a seguir apresenta a probabilidade de falha para o moto-compressor B, no nível 0, por período de operação.

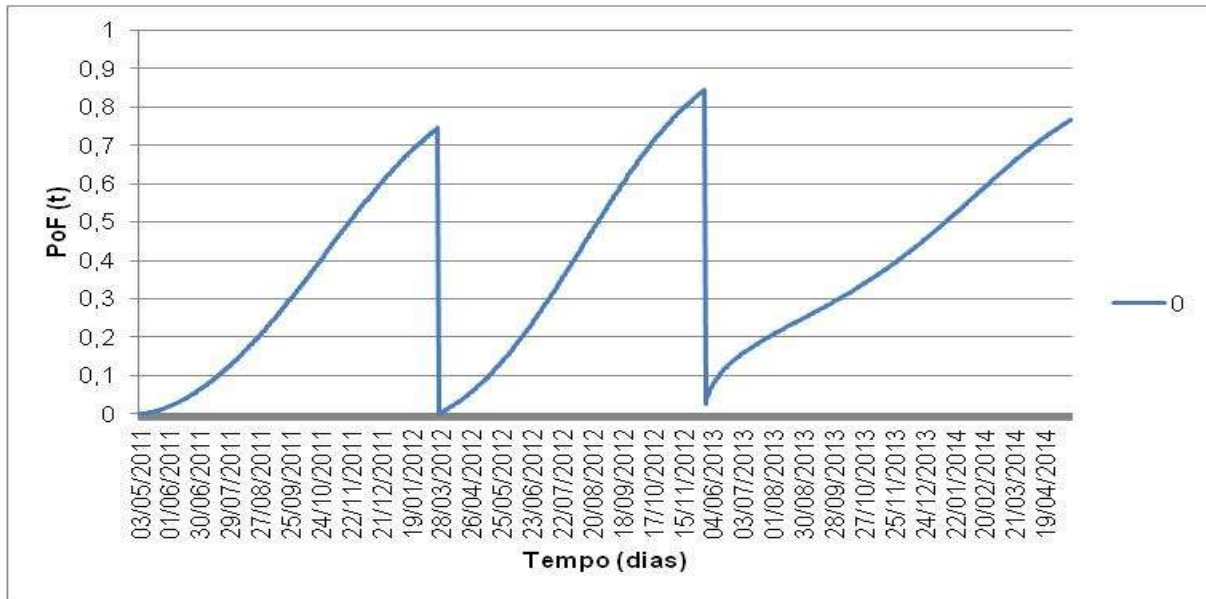


Figura 13. Probabilidade de falha do risco dinâmico do moto-compressor B no nível 0, por períodos de operação.

Deve-se destacar que a probabilidade fica nula nos períodos grandes de paradas em que foram eliminadas ou minimizadas as causas das falhas. Ou seja, o efeito “serrote” na probabilidade de falha, foi provocado pela seleção dos ciclos de operação onde o compressor apresentou maior disponibilidade no período considerado.

5.2 Risco dinâmico

A partir da Equação (4), calculou-se o risco dinâmico de cada período de operação dos moto-compressores com base nas taxonomias mais baixas que apresentem $PoF(t)$.

Assim sendo, o risco dinâmico no nível 0 dos períodos B1, B2 e B3 foi calculado através das Equações (11), (12) e (13) a seguir:

$$Riscq(t) =$$

$$\left(\left[PoF_{1.3.6}(t) \cdot CoF_{1.3.6} \cdot (\lambda_{nc} + 1)_{1.3.6} \cdot I_{A_{1.3.6}} \right] I_{A_{1.3}} + \left[PoF_{1.6}(t) \cdot CoF_{1.6} \cdot (\lambda_{nc} + 1)_{1.6} \cdot I_{A_{1.6}} \right] I_{A_1} + 2 \cdot \left[PoF_2(t) \cdot CoF_2 \cdot (\lambda_{nc} + 1)_2 \cdot I_{A_2} \right] I_{A_1} \right) \cdot \frac{1}{4} \cdot F_{S_{B1}} \quad (11)$$

$$\left(\left[\left[PoF_{1.3.5}(t) \cdot CoF_{1.3.5} \cdot (\lambda_{nc} + 1)_{1.3.5} \cdot I_{A_{1.3.5}} \right] + \left[PoF_{1.3.6}(t) \cdot CoF_{1.3.6} \cdot (\lambda_{nc} + 1)_{1.3.6} \cdot I_{A_{1.3.6}} \right] I_{A_{1.3}} \right] I_{A_1} + 2 \cdot \left[PoF_{2.2}(t) \cdot CoF_{2.2} \cdot (\lambda_{nc} + 1)_{2.2} \cdot I_{A_{2.2}} \right] I_{A_2} \right) \cdot \frac{1}{4} \cdot F_{S_{B2}} \quad (12)$$

$$\left(\left[PoF_{1.3}(t) \cdot CoF_{1.3} \cdot (\lambda_{nc} + 1)_{1.3} \cdot I_{A_{1.3}} \right] + \left[PoF_{1.6}(t) \cdot CoF_{1.6} \cdot (\lambda_{nc} + 1)_{1.6} \cdot I_{A_{1.6}} \right] I_{A_1} + 2 \cdot \left[PoF_{2.2}(t) \cdot CoF_{2.2} \cdot (\lambda_{nc} + 1)_{2.2} \cdot I_{A_{2.2}} \right] I_{A_1} \right) \cdot \frac{1}{4} \cdot F_{S_{B3}} \quad (13)$$

Nas Figuras 14 e 15, temos os resultados dos cálculos numéricos do risco dinâmico comparado ao risco tolerável, para a condição por período de operação dos conjuntos moto-compressores B e C, respectivamente, para o nível 0 da FTA.

Notamos que mesmo com a máquina parada/desligada (identificado quando a operação é nula pelo gráfico) há instrumentos alarmando. Provavelmente, esses eventos ou valores estão associados a testes de manutenção e comissionamento durante o retorno à produção.

Outro aspecto que se observa é que os eventos de intensificação são mais frequentes e mais intensos próximos aos períodos de parada das máquinas.

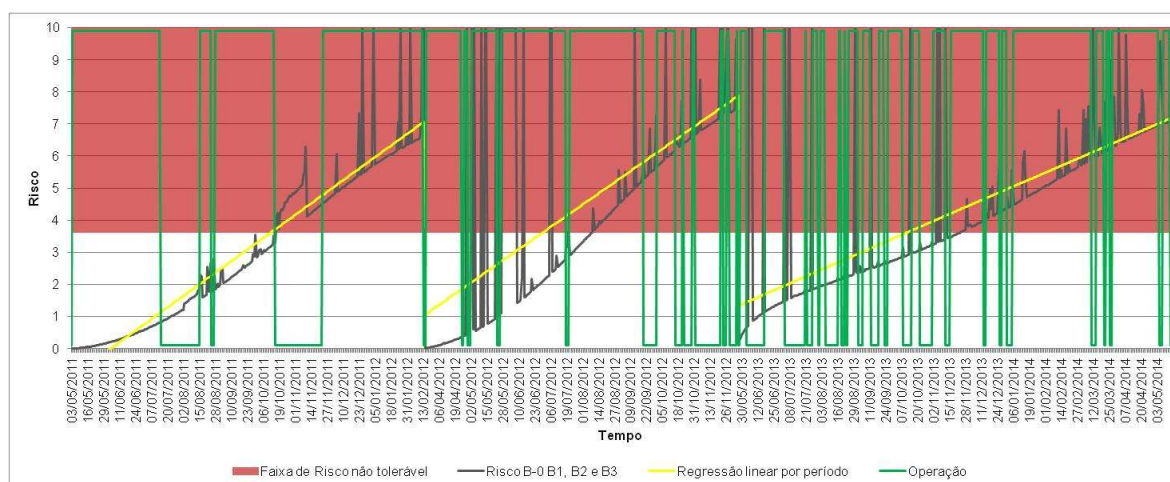


Figura 14. Risco dinâmico do moto-compressor B no nível 0, por períodos de operação.

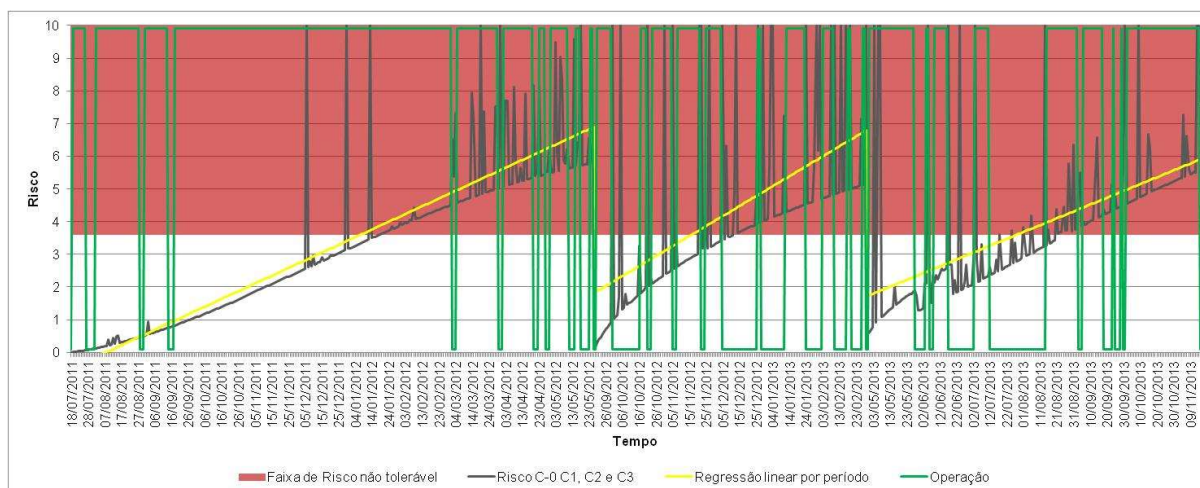


Figura 15. Risco dinâmico do moto-compressor C no nível 0, por períodos de operação.

Este comportamento ilustra, pelo menos qualitativamente, que o modelo cumpre o seu papel de compilar distintas informações de processo e manutenção em um alerta unificado na forma do valor risco, para que ações mitigadoras sejam tomadas.

Cabe acrescentar na forma de comentário, que algumas ocorrências de intertravamentos não resultaram na queda ou parada do equipamento, o que indica uma possível falha no instrumento ou uma manobra de operação no processo.

5.3 Risco por elemento do sistema

Já as Figuras 16 e 17 apresentam os valores de risco das taxonomias que foram utilizadas no equacionamento do risco dinâmico no nível 0 dos moto-compressores, com o intuito de verificar quem são os equipamentos que intensificam de forma mais preponderante o risco.

Pode-se perceber que a taxonomia 1.6 (Miscelânea) é a que mais incrementa o risco dinâmico do moto-compressor B dentro do período B1, levando-o à região não-tolerável. O mesmo pode ser percebido da taxonomia 2.2 (Unidade de motor de combustão) no período B2 e das taxonomias 1.6 e 1.3 (Controle e monitoração) no período B3.

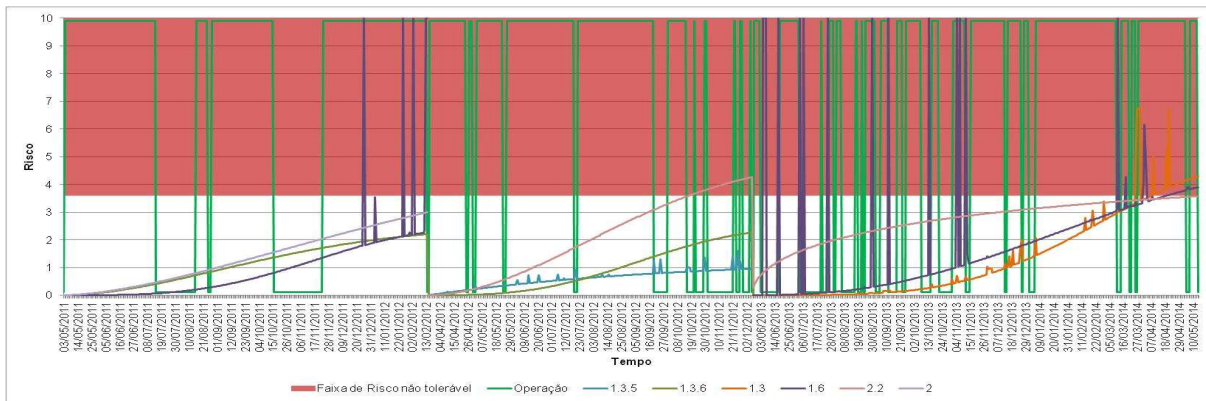


Figura 16. Formulação gráfica do risco dinâmico por taxonomias no conjunto moto-compressor B.

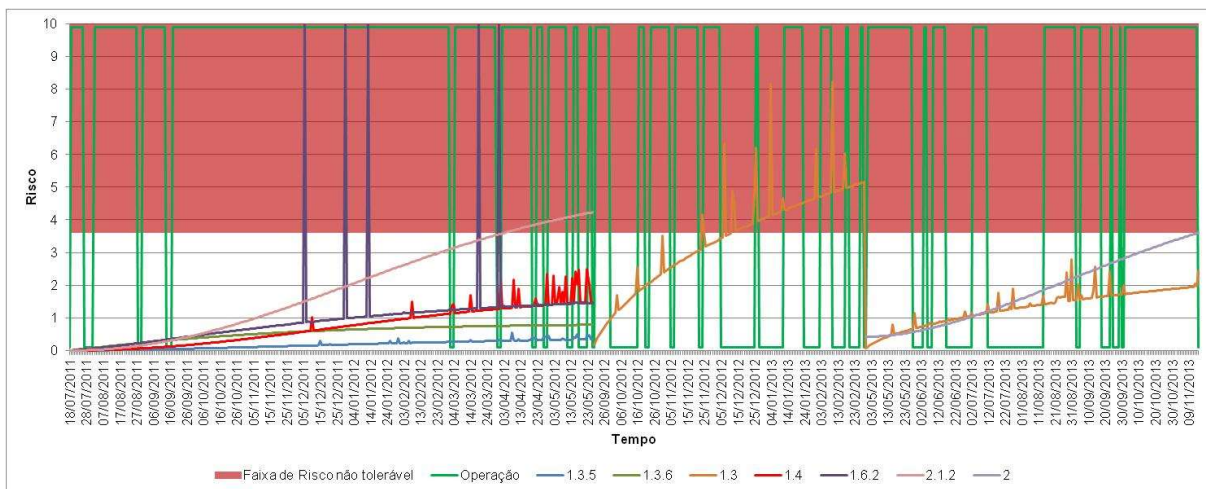


Figura 17. Formulação gráfica do risco dinâmico por taxonomias no conjunto moto-compressor C.

A Figura 17 mostra que no período C1, as taxonomias 1.6.2 (Tubulações, suporte de tubulação e foles) e 2.1.2 (Unidade de partida) são as que mais incrementam o risco dinâmico do moto-compressor C, enquanto que no período C2 e C3, são as taxonomias 1.3 e 2 (Motor de Combustão), respectivamente.

6. CONCLUSÕES

Quanto ao tratamento de dados, a adoção do modelo de Weibull se mostrou mais apropriado para esse tipo de equipamento, permitindo a construção das correlações de probabilidade de falhas para os três compressores de gás investigados.

Referente ao tratamento de dados da máquina A, observou-se que apesar do valor do parâmetro β indicar para a região de quebra em vida útil, durante a análise do ciclo operacional, demonstrou-se que ainda se encontra com problemas de comissionamento e/ ou fabricação.

Quanto ao desempenho e performance das máquinas B e C, apesar da falta de informações sobre os motivos de seus desligamentos, apresentaram curvas de regressão linear semelhantes. Entretanto, no ponto de vista de MTBF, MTTR e Disponibilidade operacional, todos os 3 conjuntos demonstraram resultados insatisfatórios.

A adoção de um modelo semi-quantitativo do cálculo do risco, permitiu definir níveis de risco não tolerável considerando aspectos financeiros, de segurança, de pessoas e meio ambiente.

Quanto ao desenvolvimento do modelo, o mesmo pode contemplar dados históricos e instantâneos de manutenção e processo, de forma semi-quantitativa, permitindo o cálculo do risco em tempo real, dito dinâmico, através do uso de coeficientes intensificadores.

Na análise das curvas de probabilidade de falhas, que foram obtidas através do emprego do quantitativo de falhas e de inspeções, quando se aplica os intensificadores de alarmes, intertravamentos e ações de manutenção preditiva, resultaram em incrementos de espectro que precipitam dentro da região de risco não tolerável. Ou seja, os intensificadores cumpriram o seu papel no incremento da curva do risco, predispondo a necessidade de manutenção.

Quanto aos resultados, o modelo proposto pôde mostrar as taxonomias ou elementos que mais contribuem para o aumento do risco dinâmico dos equipamentos.

A análise dinâmica e integrada proposta neste modelo proposto, ao combinar eventos de manutenção e de processo, permite ao menos qualitativamente elencar os principais sistemas e equipamentos que contribuem significativamente para as paradas das máquinas e principalmente alertar de forma preditiva devido à análise sistêmica proposta para a necessidade de ações mitigadoras de paradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 14224, 2011. *Indústrias de petróleo e gás natural - Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamentos*.

Brown, S. & May, I., 2003. *Risk-based hazardous protection and prevention by inspection and maintenance*. Transactions ASME Journal of Pressure Vessel Technology 122, 362-367.

ISO 17776, 2000. *Petroleum and natural gas industries. Offshore production installations - Guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment*. First edition

ISO 55000, 2014. *Asset management - Overview, principles and terminology*. First edition.

Khan, F. & Haddara, M., 2003. *Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning*. Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, St. John's, Nfld, Canada A1B 3X5.

Khan, F. & Haddara, M., 2004. *Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities*. Journal of Hazardous Materials A108, 147-159, 2004.

OREDA, 2002. *Offshore Reliability Data 4th Edition*. SINTEF Industrial Management.

PG-1E1-00425-0, 2009. *Metodologia para Qualificação de Risco de Dutos Terrestres no E&P*. Norma Petrobras.

Sharabah, A., Setunge, S. & Zeepongsekul, P., 2006. *Use of Markov Chain for Deterioration Modeling and Risk Management of Infrastructure Assets*. School of Civil and Chemical Engineering RMIT University, Melbourne, Australia.

Thom, F., 2003. *Cálculo da Confiabilidade de Tubulações de Óleo e Gás baseado em Amostragem por Hipercubo Latino e Estratificada*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo.

Tinga, T., Soute, D. & Roeterink, H., 2010. *Guidelines for Condition Based Maintenance*. World Class Maintenance, version 2.0.