

Análise de falhas de um compressor alternativo de CO₂ através do diagrama de Ishikawa e da distribuição Weibull

José Filipe Michel Gagliano Ferreira (Universidade Federal da Bahia) gagliano.fm@gmail.com
Salvador Ávila Filho (Universidade Federal da Bahia) avilasalva@gmail.com
Cristiano Hora de Oliveira Fontes (Universidade Federal da Bahia) cfontes@ufba.br
Silvio Alexandre Beisl Vieira de Melo (Universidade Federal da Bahia) sabvm@ufba.br

Resumo:

O desenvolvimento de processos mais complexos, onde as unidades de uma planta estão cada vez mais interligadas, necessita de esforços maiores para garantir a integridade, a segurança e o bom operacional. A ocorrência de eventos indesejados em qualquer processo gera impactos econômicos, ambientais e sociais que, a depender da gravidade, podem ser catastróficos. Neste sentido, este trabalho traz um modelo de investigação baseado na análise de confiabilidade de um compressor alternativo de CO₂, incluindo-se elementos humanos e organizacionais no processo de falha através da construção do diagrama de Ishikawa. Equipamentos mecânicos, como os compressores alternativos, são propícios a falhas por desgaste, principalmente por estarem submetidos a condições de operação extremas (altas temperatura e pressão). Estas e outras falhas podem ter origem ou sofrer forte influência de diversos fatores. O resultado dessa análise mostra que o projeto do sistema de compressão e a gestão da manutenção são elementos chaves para o bom funcionamento do equipamento. As inconsistências no projeto potencializam o efeito de aspectos relacionados ao contexto humano-organizacional na operação do compressor e, principalmente, na identificação das falhas.

Palavras chave: Análise de Falhas, Compressor Alternativo, Confiabilidade, Diagrama de Ishikawa.

Failure analysis of a CO₂ reciprocating compressor through the Ishikawa diagram and the Weibull distribution

Abstract

The development of more complex processes, in which the units of a plant are increasingly interconnected, requires greater efforts to ensure the integrity, security and good performance of operation. The occurrence of unwanted events in any process generates economic, environmental and social impacts that, depending on their severity, can be catastrophic. Thus, this work proposes a research model based on reliability analysis of a CO₂ alternative compressor taking in account the effects of human and organizational factors on the failure process through the construction of Ishikawa's diagram. Mechanical equipments such as reciprocating compressors are prone to wear-out failures, mainly due to extreme operating conditions (high temperature and pressure). These and other failures may originate or be strongly influenced by several factors. The results of this analysis indicate that the compression system design and the maintenance management are key elements for the proper functioning of equipment. Inconsistencies in the project increase the effect of aspects related to human and organizational issues in the compressor operation and especially in the fault detection.

Key-words: Failure Analysis, Reciprocating Compressor, Reliability Analysis, Ishikawa Diagram.

1. Introdução

O diagnóstico precoce de perturbações no processo, do mau funcionamento de equipamentos e de outros eventos indesejados desempenha um papel importante em segurança, assim como melhora a eficiência de processos/equipamentos e impacta diretamente na qualidade do produto (GALICIA; HE, 2012). Neste sentido, várias técnicas e metodologias vêm sendo largamente aplicadas como, por exemplo, a análise dos modos e efeitos de falhas (FMEA, acrônimo em inglês), diagrama de causa e efeito (ou diagrama de Ishikawa), análise de causa raiz, manutenção centrada em confiabilidade, entre outras.

Os avanços da tecnologia são importantes para garantir um maior controle nos processos industriais, obter respostas mais rápidas em eventos indesejados e diminuir a ação humana em atividades de alto risco. Por outro lado, todos esses fatores também são responsáveis por aumentar a complexidade do sistema e, quando associados às questões humanas, dificultam a tomada de ações eficazes na prevenção de falhas devido à identificação inadequada da causa raiz. Assim, faz-se necessário o uso de técnicas que também levem em consideração os fatores humanos nos processos de investigação.

Os processos das mais diversas áreas industriais empregam uma grande variedade de equipamentos que podem ser classificados em estáticos e rotativos. Compressores, bombas, sopradores são alguns exemplos de equipamentos rotativos muito comuns e vitais na indústria química e petroquímica. Uma falha nestes equipamentos pode ser muito crítica por provocar danos irreparáveis à máquina, perda de produção e elevados riscos aos trabalhadores. Dessa forma, o correto diagnóstico da causa raiz e a sua identificação, quando ainda estão em sua fase inicial, representam quesitos fundamentais para que a gestão da manutenção defina qual estratégia é a mais adequada na solução dos problemas. Para esta finalidade, a ferramenta confiabilidade tem sido uma aliada muito importante nas plantas industriais.

Objetivo deste trabalho é estudar os principais mecanismos e modos de falha de um compressor de CO₂ do tipo alternativo horizontal (pistão) de uma indústria petroquímica. Primeiramente foi utilizado o diagrama de Ishikawa como ponto de partida para analisar os fatores técnicos e humanos que podem influenciar na perda de eficiência ou ocasionar a parada do equipamento. Em seguida, é realizada a análise de confiabilidade para avaliar o comportamento do compressor frente aos modos de falhas e a atuação da manutenção.

2. Análise de falhas

Nenhum sistema é 100% confiável, independente de quão sofisticado seja. As falhas podem se manifestar de diferentes formas e causar danos diversos. Elas tornam clientes insatisfeitos, levam à indisponibilidade de equipamentos, aumentam os custos de garantia, propiciam acidentes e, potencialmente, prejuízos à imagem da empresa. Portanto, as falhas devem ser evitadas (BERGMAN et al., 2002).

Devido ao risco potencial oferecido em caso de falhas e aos incontáveis casos de acidentes, existe uma intensa discussão na academia sobre a natureza das falhas e sua tipificação. Ahmad et al. (2012) classificam as falhas em dois tipos: funcional e potencial. O primeiro tipo descreve a falha como sendo uma incapacidade de um item (ou o componente que o contém) em atender a um padrão de desempenho especificado, enquanto que falha potencial é uma condição física identificável indicando uma falha funcional iminente. Outra definição leva em consideração a questão de reparos dos danos. Neste sentido, ainda segundo Ahmad et al. (2012), as falhas podem ser mínimas (podem ser evitadas com reparo mínimo) ou catastróficas (necessitam de um reparo maior).

O propósito de uma investigação de falha é estabelecer o mecanismo, a causa da falha e recomendar uma solução para o problema. Segundo Bhaumik (2009), as falhas não “simplesmente acontecem”, mas frequentemente “são causadas”, e a determinação da causa gera o aprendizado organizacional que ajuda a evitar a recorrência de falhas similares no futuro. Por esta visão, a questão da ocorrência das falhas ganha uma nova dimensão, o fator humano-organizacional, e torna o processo de investigação complexo e desafiador.

Geralmente, uma investigação de falhas pára após a identificação de uma causa imediata ou a simples causa física (BHAUMIK, 2009; 2010). A causa imediata (ou primária) é definida como “eventos que ocorreram, incluindo quaisquer condições que existiam imediatamente antes da falha, que resultaram diretamente na sua ocorrência e se eliminadas ou alteradas teriam impedido o fracasso” (BHAUMIK, 2010). Por outro lado, as falhas geralmente são desencadeadas por múltiplos fatores. Dennies (2002) reúne em uma lista o que, segundo sua experiência, são as razões de uma falha: serviço e operação (uso e mau uso); manutenção inadequada; testes inadequados; erros de montagem; erro de fabricação; e erro de projeto (fase de concepção).

Existe uma grande variedade de técnicas na literatura utilizadas no processo de investigação, como a FMEA, os 5 Porquês, o diagrama de Ishikawa, o de Pareto, entre outras. Geralmente, algumas dessas técnicas são reunidas em uma metodologia estruturada para identificar a causa básica do problema como, por exemplo, a análise de causa raiz. A confiabilidade é outra ferramenta que vem sendo utilizada no meio industrial para definição de melhores estratégias de manutenção e também como apoio na investigação de falhas.

Compressores alternativos por suas características próprias estão susceptíveis a diversos modos de falhas exigindo dos fabricantes um constante desenvolvimento, no sentido de oferecer produtos mais confiáveis, e dos usuários melhores práticas de operação e manutenção.

3. Análise de confiabilidade

A confiabilidade é um dos temas mais importantes na engenharia. Segundo Clausing e Frey (2005) um sistema confiável deve ser capaz de evitar modos de falhas até mesmo em presença de uma ampla variedade de condições, que incluem ambientes agressivos, mudanças operacionais e deterioração interna.

Durante o progresso da engenharia de confiabilidade formou-se um conceito tradicional de confiabilidade conhecido como: “a probabilidade de que um componente ou sistema funcionando dentro dos limites especificados, não falhe durante o período de tempo previsto para a sua vida, dentro das condições de agressividade do meio (LAFRAIA, 2001)”. Esta abordagem traz elementos muito conhecidos, tais como os modos de falhas, condições operacionais e ambientais que, por sua vez, se relacionam com os modelos probabilísticos, funções de sobrevivência, taxas de falhas, tempos médios entre falhas e outros parâmetros (BHAMARE et al., 2007). A escolha de qual parâmetro estudar pode resultar em análises diferentes.

Para realizar qualquer tipo de análise de confiabilidade é preciso antes observar a complexidade do sistema e o papel da manutenção no processo de renovação dos componentes. Em sistemas mais simples (não reparáveis) a confiabilidade é modelada através da estimação de parâmetros de funções relacionadas ao tempo de vida do componente.

A maioria dos equipamentos industriais frequentemente sofre reparos após falhar. Nesses casos, em que a complexidade do sistema não possibilita a substituição por um novo, o modelo de confiabilidade deve levar em conta o esquema físico de operação, práticas de

manutenção, a própria arquitetura do sistema (série/paralelo) e fatores humanos (LOMAN; WANG, 2002).

Uma das formas de análise de confiabilidade é através de métodos estatísticos paramétricos que requerem a especificação de uma distribuição de probabilidade, tais como Exponencial, Weibull, Normal, Lognormal, Logística, Loglogística, Gama, entre outras. Neste tipo de análise, o primeiro passo é verificar qual modelo melhor se ajusta aos dados através da análise de indicadores como o coeficiente de correlação (r^2), caso utilize o método de mínimos quadrados para ajuste dos parâmetros da distribuição. Em seguida, identifica-se qual o melhor modelo que descreve o caso em estudo, entre os que obtiveram o melhor ajuste.

4. Descrição do estudo de caso – compressor alternativo de CO₂

O sistema de compressão de CO₂ neste estudo de caso, como mostra a Figura 1, é composto por um compressor centrífugo “booster” (C-A) e mais três compressores alternativos (C-B/C/D). O gás vindo de outra planta a baixa pressão (0,3 a 0,4 kgf/cm²) é distribuído para a alimentação do compressor centrífugo e do compressor alternativo C-D. Em cada alimentação dos compressores C-A/D é introduzido uma pequena quantidade de ar para apassarivar o aço inox e assim minimizar os efeitos corrosivos nos equipamentos. Após a compressão o gás passa por um vaso separador de óleo e segue para alimentação em um reator.

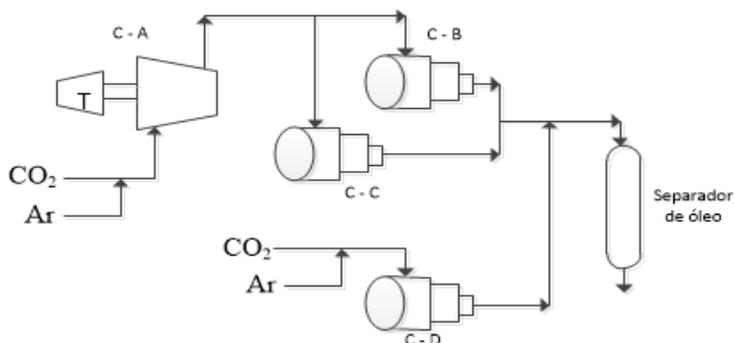


Figura 1 – Sistema de compressão do CO₂

No “booster” de CO₂ ocorre a compressão até 4,5 kgf/cm² e, posteriormente, através dos dois compressores alternativos idênticos, até 250 kgf/cm². Cada um dos C-B/C é responsável por 28 % da capacidade da planta, sendo os 44 % restantes fornecidos pelo compressor C-D a uma mesma pressão de descarga.

O objeto de estudo deste trabalho limita-se ao compressor alternativo C-B. O gás é recebido no primeiro estágio (~4,5 kgf/cm²) e comprimido sequencialmente até o último estágio, de modo a atingir a pressão de descarga requerida para o processo, como mostra a Tabela 1. O acionamento desse compressor é feito por um motor elétrico.

Variável	1º Est.	2º Est.	3º Est.	4º Est.
P. de sucção (kgf/cm ²)	4,5	19,2	50	120
T. de sucção (°C)	40	50	50	80
P. de descarga (kgf/cm ²)	19,4	51	122	260
T. de descarga (°C).	153	128	127	141

Tabela 1 – Dados de pressão e temperatura nos quatro estágios

A parada do compressor não necessariamente leva à parada da planta. No entanto, a falta de redundância desses compressores afeta diretamente a produção, isto é, reduz a capacidade da planta em 28 %. Além disso, a depender da natureza do evento, uma falha pode causar danos severos ao equipamento e colocar em risco a vida dos trabalhadores.

5. Análise dos resultados

5.1 Aplicação do diagrama de Ishikawa

A Figura 1 mostra os efeitos de paradas não programadas dos compressores de CO₂ ao longo dos últimos cinco anos em uma indústria petroquímica. O eixo principal (gráfico de barras) representa a participação desses equipamentos na perda da produção em comparação com todos os outros equipamentos de uma unidade da planta em estudo. O eixo secundário é a quantificação em toneladas dessa perda.

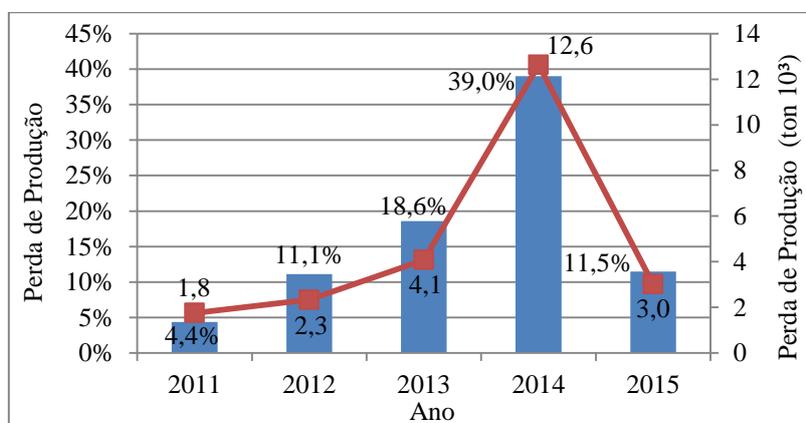


Figura 2 – Perda de produção devido a paradas não programadas dos compressores de CO₂

Através da Figura 1, percebe-se que houve um aumento considerável na perda de produção por problemas nos compressores entre o período de 2011 a 2014. Em 2014, essa perda representou quase 40 % de todos os outros equipamentos de uma unidade da planta industrial. Essa expressiva participação dos compressores, ainda que não ocorra em todos os anos, evidencia o potencial que esses equipamentos possuem de impactar a saúde financeira da empresa.

A identificação de elementos que, individualmente ou em conjunto, ocasionam (ou têm o potencial de ocasionar) eventos indesejados nos compressores está representada na Figura 2. A construção do diagrama de Ishikawa levou em consideração no máximo dois níveis das causas potenciais em uma tentativa de abordar fatores de aspecto técnico, humano e organizacional.

Conforme o diagrama de Ishikawa, as principais causas físicas de paradas no compressor em estudo são o ruído anormal (batida de válvula anormal, por exemplo), vibração, vazamentos de CO₂, sobreaquecimento na descarga e desgaste de componentes. Quando os compressores são bem projetados e instalados, essas falhas são mais fáceis de serem controladas e previstas.

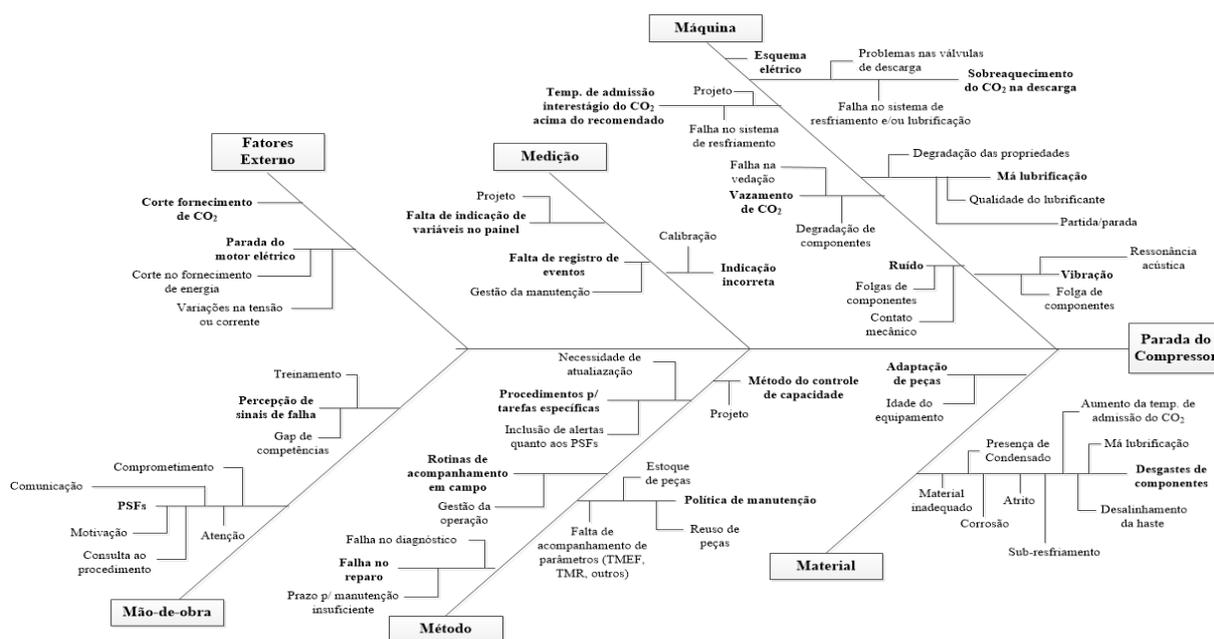


Figura 3 – Diagrama de Ishikawa para avaliação das causas de parada do compressor de CO₂

Deficiências no projeto geralmente configuram-se como elementos potenciais na geração de falhas prematuras. Neste estudo de caso, verificou-se que a presença de condensado devido ao subdimensionamento dos vasos de separação tem o potencial de ocasionar o desgaste de componentes internos (pistões, selos, válvulas, etc.) e também pode comprometer a qualidade do sistema de refrigeração (degradação da qualidade do óleo lubrificante e maior demanda de troca térmica da água de refrigeração). O resultado da análise de falhas realizada pelos mantenedores e operadores sugere uma forte ligação entre o desgaste de componentes e a presença de condensado.

Outras questões de projeto que devem ser consideradas têm relação com a temperatura de sucção (ver Tabela 1) e o método de controle de capacidade. Com relação à temperatura de sucção o Instituto Americano de Petróleo recomenda em sua norma API 618 que a temperatura de sucção não deve ultrapassar o valor máximo de 45°C. Já o método de controle de capacidade (by-pass), que também funciona como um mecanismo de segurança, é considerado como um dos menos eficientes entre os existentes (SILVA, 2009). Uma de suas aplicações consiste em recircular o fluido de descarga do primeiro estágio para sucção do mesmo. A depender do percentual de gás recirculado e da frequência com que é realizado, os componentes da câmara do cilindro, do pistão e das válvulas de sucção poderão sofrer com o aumento da temperatura, uma vez que o gás recirculado está a uma temperatura maior do que a sucção em operação normal.

Por sua importância no processo e por questões de segurança, os compressores mais modernos, além de serem altamente automatizados, utilizam as mais variadas técnicas para predição de falhas como, por exemplo, o acompanhamento de vibração, de ruído e de variáveis como a pressão e temperatura de descarga/admissão em cada estágio. Quando esses parâmetros não têm um monitoramento apropriado, seja por falta de instrumentação (leitura de temperatura apenas em campo), ou ainda, por falta de rotinas de acompanhamento adequadas, o diagnóstico de falhas através da percepção de sinais torna-se impraticável. O acompanhamento dos desvios nas variáveis que dão indícios de anormalidades não depende apenas destes fatores, mas exige também profissionais com competência, habilidade e

experiência o suficiente para a realização da tarefa. Tarefas mais críticas (por exemplo, partida e parada do compressor) também são influenciadas por outros elementos conhecidos como fatores de desempenho humano (PSF), como o nível de estresse do operador, a comunicação (escrita e oral), a interface homem-máquina, o comprometimento, a motivação, a cultura, entre outros.

Aspectos relacionados com o procedimento como, por exemplo, o processo de escrita com participação dos operadores, a inclusão de alertas quanto aos fatores humanos (necessidade de maior atenção, esforço físico, etc.) e a consulta ou o percentual de segmento deste documento são condições que favorecem o erro humano. Em ferramentas quantitativas de taxas de erro humano como, por exemplo, SPAR-H, THERP, HEART, esses aspectos contribuem significativamente para o aumento da probabilidade de erro humano.

Outro elemento presente na Figura 3 que representa um aspecto muito importante na prevenção e correção de falhas é a manutenção. Atualmente, o emprego da confiabilidade tem sido um forte aliado no planejamento da manutenção, mas que necessita do histórico de falhas (modos de falhas e prováveis causas imediatas), do acompanhamento de parâmetros como o tempo médio entre falhas (TMEF) e o tempo médio de reparos (TMR). O desconhecimento dessas informações impossibilita que a manutenção estabeleça o tempo ideal de intervenção no equipamento e assim evitar paradas não programadas, longos períodos de reparo ou eventos mais críticos (acidentes e danos ao equipamento). Além disso, esses parâmetros são importantes para a correta identificação dos modos de falhas e definição de medidas preventivas.

5.2 Confiabilidade

Para avaliar o comportamento do compressor frente às falhas empregou-se a análise paramétrica e o método de mínimos quadrados para ajuste dos parâmetros no Minitab. O período de análise vai de janeiro de 2011 até dezembro de 2015, perfazendo um total de 35666 horas. Os tempos entre falhas (TEF) são mostrados na Tabela 2.

Falha	TEF (h)	Falha	TEF(h)
1	1111	10	1138
2	7023	11	1621
3	1530	12	2509
4	1087	13	541
5	318	14	290
6	498	15	2071
7	5982	16	495
8	4919	17	2068
9	416	18	1398

Tabela 2 – Tempos de parada compressor devido a falhas

A Tabela 3 apresenta o resultado do coeficiente de correlação da distribuição Weibull dois parâmetros (Weibull 2P), Normal e Lognormal. A escolha destas distribuições levou em consideração à idade do equipamento (mais de 50 anos de operação), os modos de falhas aos quais está sujeito, a maioria devido a desgaste como indicado na análise de Ishikawa, e para efeito de comparação a quantidade de parâmetros – todos possuem dois parâmetros em seus respectivos modelos. Também pode ser verificado graficamente o ajuste dos dados de cada um dos modelos descritos através da curva da probabilidade de falha em função do tempo, como mostra a Figura 4 (A.1, B.1 e C.1).

Distribuição	Coefficiente de correlação
Weibull 2P	0,950
Normal	0,873
Lognormal	0,982

Tabela 3 – Coeficientes de correlação pelo método de mínimos quadrados

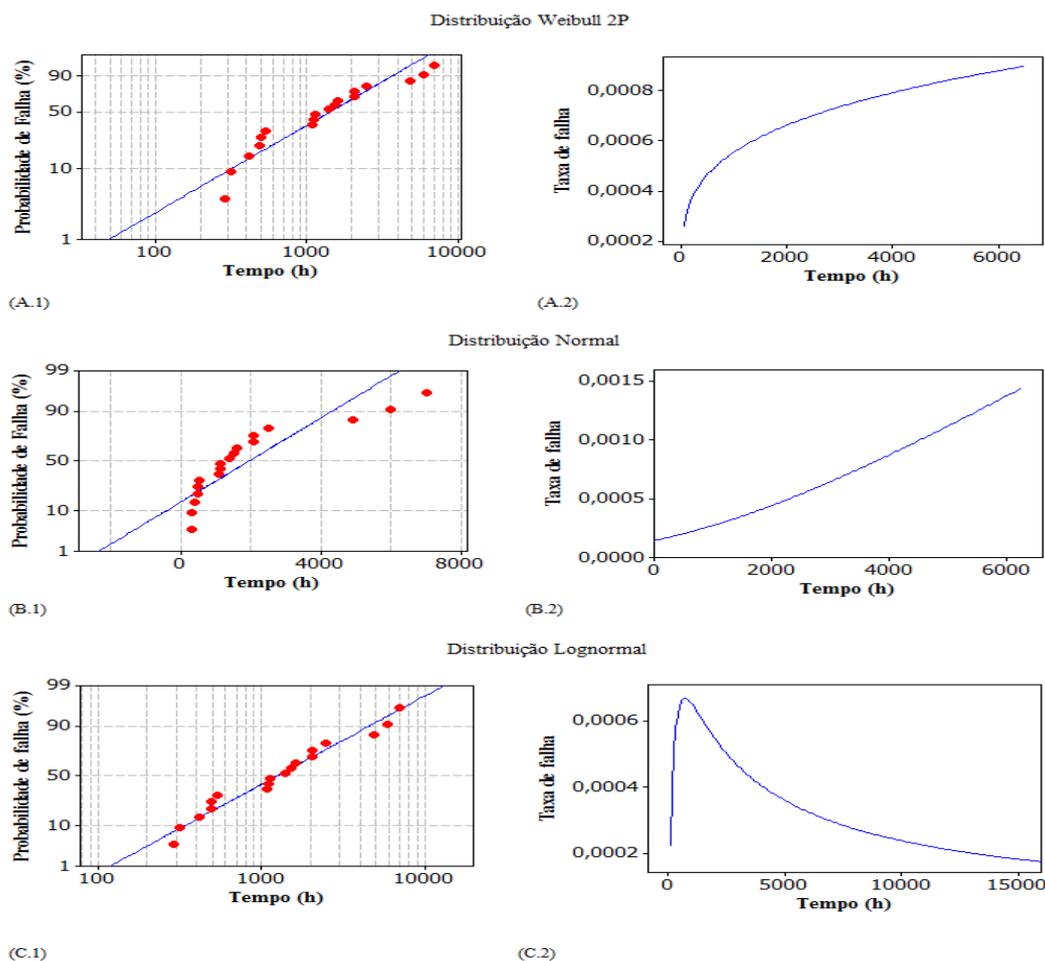


Figura 4 – Curvas de probabilidade de falha (A.1, B.1 e C.1) e taxa de falha (A.2, B.2 e C.2) em função do tempo das distribuições Weibull 2P, Normal e Lognormal, respectivamente

Os coeficientes de correlação mostrado na Tabela 3, bem como a análise gráfica das funções de probabilidade de falha (A.1, B.1 e C.1) da Figura 4, indicam que a distribuição Lognormal foi a que obteve melhor ajuste, seguida da distribuição Weibull 2P e da Normal. No entanto, a distribuição Weibull 2P foi considerada como a que melhor representa o estudo de caso, pois apresenta uma taxa de falha crescente (A.2) o que caracteriza uma zona de desgaste. De fato, como foi discutido na análise de Ishikawa, os principais modos de falhas do compressor em estudo estão relacionados à deteriorização do equipamento. Os valores dos parâmetros ajustados (β - parâmetro de forma, e η - parâmetro de escala) da função de confiabilidade da distribuição Weibull 2P e o tempo médio entre falhas (TMEF) estão na Tabela 4.

Variável	Valor
β	1,26
η (h)	1920,19
TMEF (h)	1785,86

Tabela 4 – Parâmetros da função Weibull 2P

O valor do TMEF (1785,86 horas, ou 0,2 anos) sugere que uma falha ocorra a cada 2,3 meses, aproximadamente. O fato do compressor em estudo ser um equipamento de processo, sem outro que o substitua em caso de falha, o torna imprescindível para a produção. Portanto, a questão do diagnóstico precoce e o planejamento da manutenção são questões importantes para assegurar um retorno rápido à operação.

7. Considerações finais e trabalhos futuro

O diagrama de Ishikawa apresentou uma série de fatores que podem levar a falha do equipamento, incluindo ruído anormal, vazamentos, sobreaquecimento, desgastes de material (pistões e válvulas). Essas falhas estão fortemente relacionadas com deficiências no projeto, principalmente a questão do dimensionamento dos vasos separadores. Além disso, o diagrama de causa e efeito também sugere que outros fatores (não técnicos) podem influenciar no processo de falha e/ou restauração do sistema, entre os quais o registro inadequado (ou a falta dele) das ocorrências no equipamento e a política de manutenção sem acompanhamento dos indicadores de desempenho (tempos entre falhas, tempos de reparo e disponibilidade).

O comportamento crescente da taxa de falha em função do tempo da distribuição Weibull 2P, conforme mostra a Figura 4 (A.2), também indica que os modos de falhas estão relacionados com a idade do equipamento. Levando em consideração esse comportamento, uma aplicação da metodologia MCC (manutenção centrada em confiabilidade) poderia ser útil para definição da melhor estratégia de manutenção do ativo.

A própria importância do equipamento para o processo/produção implica no uso de medidas mais eficazes, a começar pelo diagnóstico das falhas que necessita ser o mais precoce possível.

Referências

AHMAD, R.; KAMARUDDIN, S.; AZID, I. A.; ALMANAR, I. P. *Failure analysis of machinery component by considering external factors and multiple failure modes – A case study in the processing industry.* Engineering Failure Analysis Vol. 25, p. 182–192, 2012.

BERGMAN, B. L. S.; FUNDIN, A. P.; GREMYR, I. C.; JOHANSSON, P. M. *Beyond root-cause analysis.* Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002.

BHAMARE, S. S.; YADAV, O. P.; RATHORE, A. *Evolution of reliability engineering discipline over the last six decades: a comprehensive review.* International Journal of Reliability and Safety Vol. 1, n. 4, p. 377-410, 2007.

BHAUMIK, S. K. *A View on the General Practice in Engineering Failure Analysis.* Journal of Failure Analysis and Prevention Vol. 9, n. 3, p. 185-192, 2009.

BHAUMIK, S. K. *Root cause analysis in engineering failures.* Transactions of The Indian Institute of Metals Vol. 63, n. 2, p. 297-299, 2010.

CLAUSING, D.; FREY, D. D. *Improving System Reliability by Failure-Mode Avoidance Including Four Concept Design Strategies.* Systems Engineering Vol. 8, n. 3, p. 245–261, 2005.

DENNIES, D. P. *The organization of a failure investigation.* Journal of Failure Analysis and Prevention Vol. 2, n. 3, p. 11-16, 2002

GALICIA, H. J.; HE, Q. P.; WANG, J. *Statistics pattern analysis based fault detection and diagnosis.* Proceedings of CPC VIII Conference, 2012.

LAFRAIA, J. R. B. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade.* Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LOMAN, J.; WANG, W. *On reliability modeling and analysis of highly-reliable large systems.* Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002.

SILVA, N. P. *Compressores alternativos industriais: teoria e prática.* Rio de Janeiro: Interciência, 2009.