

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ELABORAÇÃO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO PARA UM CONJUNTO DE
BOMBAS INDUSTRIAIS BASEADO NO MÉTODO DE MANUTENÇÃO
CENTRADA EM CONFIABILIDADE

por

Isabele Bisognin Cervo

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da
Escola de Engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Engenheira Mecânica.

Porto Alegre, Novembro de 2018

ELABORAÇÃO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO PARA UM CONJUNTO DE
BOMBAS INDUSTRIAIS BASEADO NO MÉTODO DE MANUTENÇÃO
CENTRADA EM CONFIABILIDADE

por

Isabele Bisognin Cervo

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRA MECÂNICA
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr^a Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. José Antonio Esmerio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. José Antonio Esmerio Mazzaferro

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Porto Alegre, 30 de Novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Nesta oportunidade, não poderia deixar de agradecer aqueles que me apoiaram durante a graduação e durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Irinês e Ibanês, por abdicarem de seus sonhos para que eu pudesse viver os meus. Por sempre estarem presentes, nas horas boas e ruins, me dando apoio incondicional, com tanto carinho e amor.

À minha irmã e melhor amiga, Isadora, por me ensinar todos os dias a ser uma pessoa melhor, através de seus exemplos de determinação e ética. Pela parceria e amor desde o meu nascimento até hoje, até sempre.

Ao meu amor, Rafael, por estar presente nos momentos que mais precisei neste último ano, me incentivando a continuar, sendo um verdadeiro parceiro, nunca permitindo que eu me sentisse só, mesmo a quilômetros de distância.

Aos meus amigos, colegas e familiares, por entenderem os esforços destinados à graduação, por todas as palavras de conforto nos momentos difíceis, por todos os momentos de descontração. A vida é mais leve com vocês!

Aos meus colegas da Braskem, que me ajudaram não apenas neste trabalho, mas que tiveram o cuidado de me proporcionar a melhor experiência de estágio possível, sendo verdadeiros amigos.

Ao orientador deste trabalho, Prof. José Antonio Esmerio Mazzaferro, por toda o cuidado com o meu trabalho, disponibilidade e facilidade de comunicação, desde o primeiro contato até a entrega final deste trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Departamento de Engenharia Mecânica, por me proporcionar conhecimentos sólidos, mesmo com as dificuldades da educação brasileira.

CERVO, I. B. **Estudo do Método de Manutenção Centrada em Confiabilidade e sua Aplicação em Bombas Industriais**. 2018. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

A manutenção tem sido vista, cada vez mais, como uma função estratégica na indústria. Assim, a utilização de ferramentas que visem aumentar a disponibilidade dos equipamentos, garantir a segurança dos operadores e a preservar o meio ambiente vem crescendo. A técnica da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) é uma dessas ferramentas e visa estudar os modos de falha de um componente, visualizando, assim, as ações de bloqueio pertinentes a serem tomadas. A MCC fornece bases racionais para o Plano de Manutenção, redução dos custos de manutenção, particularmente da manutenção preventiva, aumento da disponibilidade da instalação, fornece uma base sistemática para o processo de melhoria contínua, maior segurança e proteção ambiental. Este trabalho segue o procedimento da MCC para a elaboração de um plano de manutenção para bombas industriais da Braskem S.A. O método consiste em determinar as funções do equipamento, suas falhas funcionais, seus modos e efeitos da falha. Posteriormente, um diagrama de decisões auxilia na escolha do tipo de manutenção a ser empregada e, finalmente, são determinadas as tarefas de manutenção, sua periodicidade e responsável. Foram encontradas quatro funções, seis falhas funcionais e trinta e oito modos de falha para as bombas em estudo, através da técnica de Análise dos Modos e Efeitos de Falhas (FMEA). Após análise das consequências dos modos de falha, da Distribuição de Weibull de alguns modos de falha, obteve-se como resultado um plano de manutenção objetivo e estruturado.

PALAVRAS-CHAVE: Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), Distribuição de Weibull, Análise dos Modos e Efeitos de Falhas (FMEA), Manutenção Industrial.

CERVO, I. B. **Study of the Reliability Centered Maintenance Method and its Application in Industrial Pumps**. 2018. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

Maintenance has been seen more and more as a strategic function in the industry. Thus, the use of tools that aim to increase the availability of equipments, ensuring the safety of operators and preserving the environment has been growing. The Reliability Centered Maintenance (RCM) technique is one of these tools and aims to study the failure modes of a component, thus visualizing the pertinent blocking actions to be taken. RCM provides a rational basis for the Maintenance Plan, reduction of maintenance costs, particularly preventive maintenance, increased availability of the facility, provides a systematic basis for the process of continuous improvement, increased safety and environmental protection. This work follows the RCM procedure for the elaboration of a maintenance plan for Braskem S.A industrial pumps. The method consists in determining the functions of the equipment, its functional failures, its modes and effects of the failure. After, a decision diagram helps in choosing the type of maintenance to be employed and, finally, the maintenance tasks, their periodicity and responsible are determined. Four functions, six functional failures and thirty eight failure modes were found for the studied pumps using the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique. After analyzing the consequences of failure modes and the Weibull distribution of some failure modes, a objective and structured maintenance plan was obtained.

KEYWORDS: Reliability Centered Maintenance (RCM), Weibull Distribution, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), Industrial Maintenance.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	1
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
3.1	Manutenção	2
3.2	Evolução da manutenção.....	2
3.3	Confiabilidade	3
3.4	Distribuição de Weibull.....	3
3.5	Natureza das falhas	4
4	METODOLOGIA E APLICAÇÃO DA MCC.....	5
4.1	Seleção do sistema e coleta de informações	5
4.1.1	Sistema de injeção	6
4.1.2	Sistema hidráulico	6
4.2	Determinação das funções e falhas funcionais	6
4.3	Análise de efeitos e modos de falha (FMEA)	7
4.4	Análise das consequências das falhas.....	9
4.5	Análise de Weibull na MCC.....	10
4.6	Planejamento de tarefas de manutenção	11
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	13
6	CONCLUSÕES.....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
	ANEXO.....	16
	APÊNDICES.....	17

1 INTRODUÇÃO

Segundo Viana, 2002, manutenção, do latim *manus tenere*, significa manter o que se tem, e está presente na humanidade há eras. A presença de equipamentos cada vez mais sofisticados e de alta produtividade exige que eles tenham altos níveis de disponibilidade e os custos da sua inatividade ou subatividade se tornaram altos, gerando a necessidade de seu uso racional. Durante a Segunda Guerra Mundial, a manutenção se firmou como necessidade, com o desenvolvimento de técnicas de organização, planejamento e controle para tomada de decisão.

Já Fogliatto e Ribeiro, 2009, apresentam a evolução da história da confiabilidade, descrita por Knight, 1991. O conceito de confiabilidade começou a ser utilizado no final da Primeira Guerra Mundial para descrever estudos comparativos feitos em aviões com diferentes quantidades de motores. No final dos anos 50 e início dos anos 60, a área da confiabilidade avançou, em decorrência da Guerra Fria, devido aos riscos envolvidos em enviar uma missão tripulada à Lua.

Conforme Monchy, 1987, a produção é o objetivo evidente, enquanto a manutenção é uma “ajuda para a produção”. Isto é, toda a atividade envolvida na manutenção visa a produção. Cada vez mais, então, deve-se evitar perdas de desempenho, custos de falhas, paradas de produção, poluição ambiental, priorizando a segurança do processo e dos trabalhadores.

De acordo com Nóbrega, 2011, equipes de manutenção interferem na lucratividade da empresa, já que mantém os ativos em condições de cumprirem o seu papel. Sendo assim, pode ser vista como uma função estratégica, já que agrega valor ao produto de maneira indireta. Com a globalização, aumentou-se a preocupação com a produção a custos competitivos. Concomitantemente, surgiu o interesse em reduzir a probabilidade de falhas em equipamentos, aumentando sua confiabilidade. Além disso, um ativo não deve ser visto apenas como fonte de renda e sim como um recurso a ser controlado e explorado, já que seu uso inadequado pode representar prejuízo financeiro, risco às pessoas, ao meio ambiente, ao patrimônio e à imagem da empresa.

Assim, segundo Fogliatto e Ribeiro, 2009, objetiva-se, através da manutenção, analisar as falhas e minimizar suas ocorrências, buscando resultados positivos de desempenho do sistema produtivo, seja garantindo ganhos de produtividade e qualidade e/ou reduzindo custos e aumentando a segurança. As indústrias têm percebido a conexão existente entre manutenção e confiabilidade e vêm adotando programas de manutenção centrados em confiabilidade (MCC ou RCM – *Reliability Centered Maintenance*). Estes têm por objetivo reduzir custos e otimizar a manutenção, promovendo melhorias na disponibilidade e segurança de equipamentos.

Viana, 2002, diz que a técnica de MCC visa estudar os modos de falha de um componente, visualizando, assim, as ações de bloqueio pertinentes a serem tomadas. A MCC fornece bases racionais para o Plano de Manutenção, redução dos custos de manutenção, particularmente da manutenção preventiva, aumento da disponibilidade da instalação, fornece uma base sistemática para o processo de melhoria contínua, maior segurança e proteção ambiental.

Este trabalho apresenta a aplicação da MCC em bombas de peróxido da Braskem S.A. Estas têm extrema relevância no contexto operacional da transformação de eteno e propeno em polietileno e polipropileno, bases da indústria do plástico, na Braskem S.A. Elas são responsáveis pela injeção de peróxido, iniciador para a polimerização, nos reatores, onde as cadeias poliméricas são constituídas. Devido à sua importância, a execução da MCC é indicada e, por isso, esse conjunto de bombas foi escolhido como alvo da aplicação do método neste trabalho.

2 OBJETIVOS

A metodologia de MCC consiste em determinar funções primárias e secundárias do equipamento, suas falhas funcionais, seus modos de falha e os efeitos da falha. Posteriormente, é aplicado um diagrama de decisões que auxilia no entendimento de qual tipo de manutenção deve ser empregado (preventiva, preditiva, corretiva ou, ainda, nenhuma manutenção). Finalmente, são determinadas as tarefas de manutenção, sua devida periodicidade e responsável.

Segundo Nóbrega, 2011, a manutenção envolve altos custos e perdas de produção, assim deve ser bem planejada para que seja feito aquilo que realmente é necessário. Assim, o

objetivo final do trabalho é a elaboração de um plano de manutenção para as bombas de peróxido, contribuindo assim para sua confiabilidade, aumentando sua produtividade e aplicando manutenções de forma consciente, baseadas em um estudo robusto.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Manutenção

A manutenção, para Nóbrega, 2011, é considerada como um conjunto de procedimentos realizados com a finalidade de substituir, reparar, revisar ou modificar componentes de uma empresa, para que seus ativos operem dentro da disponibilidade esperada pela organização.

Segundo Siqueira, 2005, a manutenção pode ser classificada quanto à programação e quanto aos objetivos. A Figura 3.1 mostra como estas classes estão subdivididas.

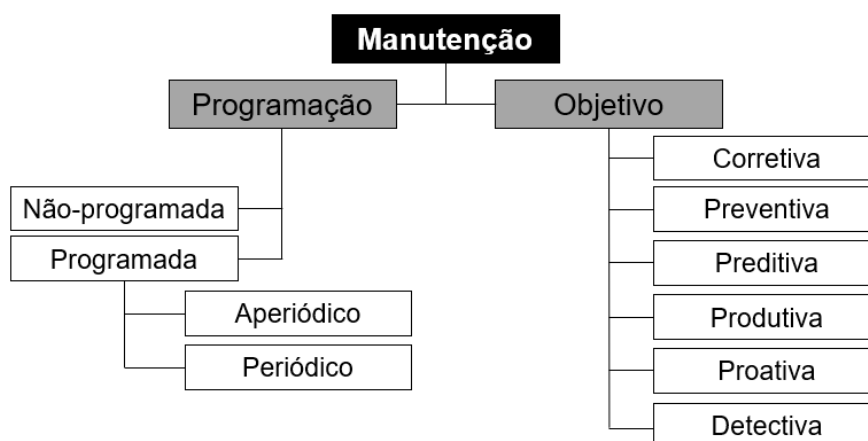


Figura 3.1 - Classificação da manutenção
Fonte: Siqueira, 2005

A classificação da manutenção quanto aos objetivos diz respeito à atitude dos usuários em relação às falhas. A NBR 5462, 1994 define os três principais tipos de manutenção que estão presentes nessa classificação. A manutenção corretiva é aquela que é efetuada após uma pane e tem a finalidade de recolocar um item em condições de executar determinada função. Ou seja, quando a manutenção corretiva é efetuada, o equipamento já falhou ou perdeu alguma de suas funções. A manutenção preventiva é aquela efetuada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios preestabelecidos, reduzindo a probabilidade de falha ou o desgaste de um equipamento. Já a preditiva é aquela que garante a qualidade de serviço desejada, através de técnicas de análise, utilizando a supervisão do equipamento.

Siqueira, 2005, sugere que a MCC fornece um método estruturado para selecionar as atividades de manutenção para algum processo, verificando qual é o tipo de manutenção mais adequado para determinado componente de um sistema. O método inclui passos bem definidos, que garantem os resultados desejados.

3.2 Evolução da manutenção

Siqueira, 2005, divide a história da manutenção em três gerações. A primeira é a da mecanização, de 1940 a 1950, onde imperava a manutenção corretiva. Ou seja, a manutenção planejada praticamente inexistia, limitando-se apenas a limpeza e lubrificação das máquinas.

A segunda geração foi a de industrialização, de 1950 a 1975, onde a maior disponibilidade de equipamentos e vida útil, a um baixo custo, tornou-se objetivo básico de avaliação de equipamentos. Assim, foram desenvolvidas técnicas de manutenção preventiva e preditiva. Em meados da década de 70, estas técnicas foram integradas pela Manutenção Produtiva Total (TPM – Total Productive Maintenance), dando origem às metodologias de terceira geração.

A terceira geração, ou automatização, ocorre na indústria a partir de 1975. Nela, a sociedade passou a exigir melhor qualidade e garantia de desempenho dos produtos. Aliado a isso, a consciência da importância da preservação do meio ambiente e da garantia de segurança para usuários de processos e produtos industriais, foram a motivação do surgimento da metodologia de MCC.

3.3 Confiabilidade

Lafracia, 2014, define confiabilidade como a “probabilidade de que um componente, equipamento ou sistema exercerá sua função sem falhas, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas”.

3.4 Distribuição de Weibull

De acordo com Fogliatto e Ribeiro, 2009, a confiabilidade é dada em termos de sua probabilidade de sobrevivência até um tempo t de interesse. Essa probabilidade pode ser determinada através da modelagem de tempos até a falha do sistema estudado. Conhecendo-se a distribuição de probabilidade de falha que melhor se ajusta a esses tempos, estima-se a probabilidade de que o item não falhe em qualquer tempo t . Por isso, a modelagem dos tempos até a falha (tempo decorrido entre o início da operação e a primeira falha), T , é vital em estudos de confiabilidade.

As distribuições de probabilidade utilizadas em estudos de confiabilidade podem apresentar até três parâmetros: de localização, de escala e de forma. Os parâmetros de localização deslocam a distribuição de probabilidade ao longo do eixo tempo, sendo também denominados de parâmetros de vida mínima ou de garantia. Já os de escala são utilizados para expandir ou contrair o eixo tempo. Por fim, os parâmetros de forma afetam, como o nome já diz, a forma da função de densidade.

A distribuição de Weibull é uma das principais distribuições de probabilidade utilizadas em análises de confiabilidade, devido à sua flexibilidade e capacidade de representar amostras de tempos até a falha com diferentes comportamentos.

As equações 3.1, 3.2 e 3.3 são as representações de confiabilidade de Weibull:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.1)$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} t^{\beta-1} e^{-\frac{t^\beta}{\eta}} \quad (3.2)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3.3)$$

onde $R(t)$ é a confiabilidade, t é tempo até a falha, η é o parâmetro de vida mínima, β é o fator de forma, $f(t)$ é a função densidade de probabilidade de falha e $\lambda(t)$ é a taxa de falha.

A função de densidade da probabilidade de Weibull e as correspondentes curvas de probabilidade condicional são mostradas na Figura 3.2.

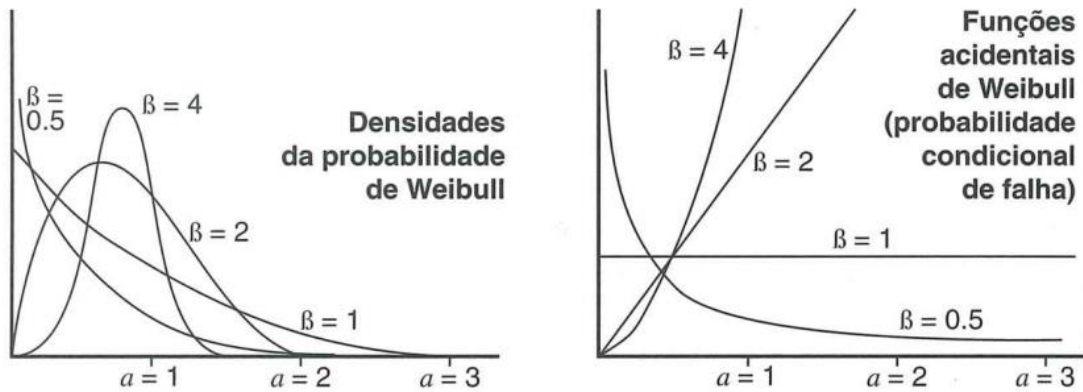


Figura 3.2 - As distribuições de Weibull
Fonte: Moubray, 2003

O fator de forma β informa sobre o período de vida atual do componente. Quando $\beta < 1$, a curva é típica de falhas prematuras. Para $\beta = 1$, as falhas são aleatórias e a taxa de falha é constante. $\beta > 1$ indica falhas por desgaste, com taxa de falha crescente.

3.5 Natureza das falhas

A Figura 3.3, adaptada de Nowlan e Heap, 1978, mostra os seis padrões de probabilidade de falhas no tempo. O eixo vertical representa a probabilidade de falha do item e o eixo horizontal representa o tempo de operação desde a fabricação ou reparo.

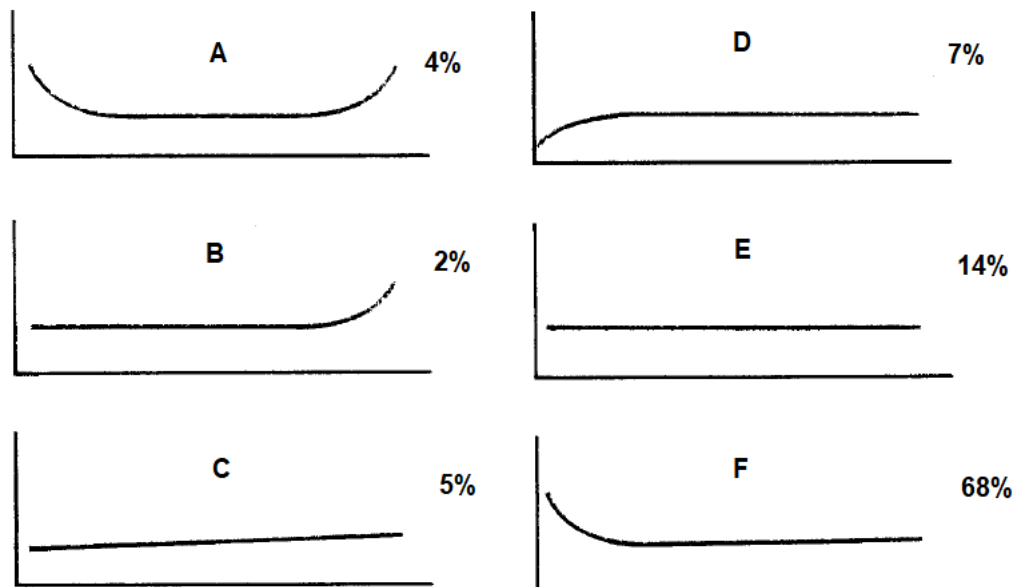


Figura 3.3 - Os seis tipos de modos de falha
Fonte: Nowlan e Heap, 1978

Os modos de falha vistos na Figura 3.3 foram identificados por Nowlan e Heap, 1978, em um estudo feito na aviação. Segundo estes autores, o modo de falha A é a chamada curva da banheira, composta por um período denominado "mortalidade infantil" (elevada taxa de falhas no início da sua vida útil, devido a problemas de fabricação ou montagem), seguido por uma probabilidade de falha constante ou gradualmente crescente e, por fim, uma região de desgaste acentuado. O modo B mostra uma taxa de falhas gradualmente crescente e uma zona de desgaste acentuado. O modo C apresenta uma taxa de falhas levemente crescente, não possuindo zona de desgaste. O modo D demonstra uma baixa probabilidade de falha quando o

item é novo, seguido de um rápido aumento até um patamar constante. O modo E mostra uma probabilidade de falha constante durante toda a vida do componente. Finalmente, o modo de falha F inicia-se com uma rápida redução da taxa de falhas, seguido de taxas constantes ao longo do tempo.

Na Figura 3.3, do lado direito de cada modo de falha, é mostrada a porcentagem de itens que tiveram o comportamento demonstrado por aquele modo de falha. De acordo com Nowlan e Heap, 1978, os modos A, B e C indicam componentes que podem se beneficiar de um limite do tempo de operação, ou seja, 11% dos componentes. Isto quer dizer que, nestes modos de falha, vale a pena estabelecer um limite de tempo de operação, visto que, a partir de um determinado tempo de operação, a probabilidade de falha do item torna-se inaceitável. Nos outros 89% dos itens, não existe motivo para estabelecer um limite de tempo de operação, visto que a probabilidade de falha é constante depois de um certo período.

Lafraia, 2014, observa que equipamentos de outros ramos industriais, que não o da aviação civil, bases para o estudo apresentado, podem não se comportar dentro dos percentuais apresentados. Porém, reflete que os modos E e F tornam-se mais predominantes à medida que a complexidade dos equipamentos cresce. Eles demonstram, através do período de constância de probabilidade de falhas, que nem sempre há uma conexão entre a confiabilidade e o tempo de operação. Ou seja, a premissa de que quanto mais cedo for a manutenção de um componente, menor será a probabilidade de falha nem sempre é verdadeira. Assim, manutenções programadas, podem aumentar a taxa de falhas, através da introdução de falhas prematuras que antes eram inexistentes. Isso não quer dizer que manutenções preventivas não devam ser consideradas, mas que, para falhas sem maiores consequências, a manutenção corretiva pode ser a mais efetiva.

4 METODOLOGIA E APLICAÇÃO DA MCC

A metodologia empregada no desenvolvimento deste trabalho, apresentada nos próximos subcapítulos, foi baseada em Moubray, 2003, com a finalidade de responder às 7 questões básicas propostas pelo mesmo autor sobre os itens sob revisão:

- Quais são as funções e padrões de desempenho de um ativo no seu contexto presente de operação?
- De que forma ele falha em cumprir suas funções?
- O que causa cada falha funcional?
- O que acontece quando ocorre cada falha?
- De que forma cada falha importa?
- O que pode ser feito para predizer ou prevenir cada falha?
- O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa proativa apropriada?

4.1 Seleção do sistema e coleta de informações

As bombas de peróxido da Braskem S.A. operam 24 horas por dia, 7 dias por semana. Apesar da pequena magnitude dos riscos ambientais, já que os danos ambientais são facilmente revertidos, possuem uma frequência de falha considerada alta no contexto da empresa, o que leva a frequentes manutenções, utilizando recursos financeiros, pessoais e gerando perda de produção. Por isso, o sistema escolhido para ser analisado através da MCC foi o sistema de bombeamento de peróxido das plantas de alta pressão, Autoclave e Tubular, na unidade PE4, visando aumentar a disponibilidade e confiabilidade do sistema.

O sistema é composto por sete bombas alternativas de êmbolo, do fabricante UHDE, como a da Figura 4.1.



Figura 4.1 - Bomba de peróxido do fabricante UHDE

Feita a definição do sistema, foi coletado e analisado o histórico de falhas do sistema (bombas) desde junho de 2014 até maio de 2018. A partir disso, foram percebidos quatro *bad actors* (componentes que mais demandam da equipe de manutenção): acoplamento do êmbolo, cilindros de peróxido, válvula de retenção e sistema de reversão.

Foram definidos os subsistemas do sistema de bombeamento: sistema de injeção de peróxido e sistema hidráulico.

4.1.1 Sistema de injeção

Nas bombas alternativas de êmbolo, como as bombas estudadas, o líquido recebe a ação diretamente de um êmbolo, que é um tipo de pistão, utilizado para pressões mais elevadas, com gaxetas na parede do cilindro. Apesar da sua aparência simples, em formato de caixa, como mostrado na Figura 4.1 acima, cada bomba possui quatro cilindros, sendo que apenas dois operam simultaneamente. Assim, há um conjunto de cilindros em operação enquanto os outros são reserva. Um sistema de reversão modifica o sentido de compressão. Assim, enquanto o êmbolo de um dos cilindros comprime o peróxido, o outro expande. Quando chega ao final do curso, o sistema de reversão faz com que se inverta o sentido da força dos êmbolos.

O sistema é composto por vaso de sucção, válvulas, êmbolos, cilindros, atuador pneumático, conexões e linhas de alta pressão.

4.1.2 Sistema hidráulico

O sistema hidráulico é responsável pela lubrificação dos componentes das bombas. Este sistema é composto por válvula de controle de pressão, bomba principal e auxiliar, cilindro intensificador, bomba de óleo de comando, motor elétrico e válvulas direcionais.

4.2 Determinação das funções e falhas funcionais

O princípio básico da MCC é preservar as funções do sistema. Por isso, é importante definir claramente todas as funções e não apenas aquelas que parecem mais importantes à primeira vista. As funções são divididas em funções primárias e secundárias. As primárias sumarizam o motivo pelo qual os ativos foram adquiridos em primeiro lugar. Ou seja, representam a razão básica para a existência de um item. As secundárias descrevem o que é esperado que o ativo faça além de atender às funções primárias. São menos óbvias do que as principais, mas suas falhas podem ter graves consequências. Uma função secundária importante para a maioria dos sistemas de proteção é não funcionar quando tudo está normal.

Assim, pensando na definição de falha e contemplando seus dois tipos (primária e secundária), foram determinadas quatro funções para o sistema de bombeamento de peróxido, duas para cada um dos subsistemas (de injeção e hidráulico). As funções determinadas são mostradas na Tabela 4.1.

A falha funcional é a incapacidade de um item em atender o desempenho desejado num dado contexto operacional. A falha da função principal é oculta, mas a falha da função secundária é evidente. Seguindo esta definição, foram determinadas seis falhas funcionais, ligadas às funções previamente estabelecidas. As falhas funcionais também se encontram na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Funções e falhas funcionais

SIST.	FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL
Sistema de injeção	Injetar peróxido no reator à devida vazão	Nenhuma injeção de peróxido
		Injeção com vazão aquém da especificada
		Injeção com vazão além da especificada
	Conter peróxido	Não conter peróxido
Sistema hidráulico	Conter o óleo utilizado no acionamento do sistema injetor	Não conter óleo
	Pressurizar o sistema de injeção	Não pressurizar o sistema de injeção

Pode-se perceber que a falha funcional é, basicamente, a negação da função. Assim, há duas formas de negar a função “Injetar peróxido no reator à devida vazão”, por exemplo. A primeira delas é negando o verbo “injetar”, obtendo-se a falha funcional de “Nenhuma injeção de peróxido”. A segunda delas é negando o complemento “à devida vazão”. Neste caso, a vazão injetada pela bomba pode ser acima ou abaixo da especificada, gerando as outras duas falhas funcionais: “Injeção com vazão aquém da especificada” e “Injeção com vazão além da especificada”. As demais funções não possuem complemento. Assim, foi necessário apenas negar o verbo da função.

4.3 Análise de efeitos e modos de falha (FMEA)

FMEA é uma técnica de análise indutiva onde o raciocínio parte da perda de função (modo de falha) de um único componente até uma conclusão geral sobre o efeito correspondente no sistema como um todo. Uma FMEA do sistema de injeção é mostrada na Tabela 4.2, como forma de exemplificação. A FMEA do sistema hidráulico está no Apêndice I.

Modo de falha é qualquer evento que causa uma falha funcional. Os efeitos da falha são as consequências que um modo de falha impõe na operação, função ou estado de um componente ou sistema. Os efeitos descrevem o que acontece quando cada modo de falha ocorre. Ruído excessivo, perda de potência, vazamentos, incêndio são alguns exemplos de efeitos. Um modo de falha pode ter mais do que um efeito, assim como o mesmo efeito pode resultar de diferentes modos de falha.

A descrição de um efeito do modo de falha pode ser simples, apenas com a consequência final, ou pode ser mais longa. Para o modo de falha “quebra do êmbolo”, por exemplo, poderia se utilizar o seguinte texto para seu efeito: “O cisalhamento do êmbolo faz com que o mesmo não tenha mais condições de comprimir o fluido. A falta de vazão de peróxido ocorrida causa uma queda de temperatura na reação que, se não revertida, causa sua cessão. A máquina para pelo descontrole de vazão (malha de controle). A quebra é percebida visualmente pelo operador. Pode haver vazamento de produto pela vedação, que será direcionado para local adequado. Manualmente, passa-se a operação para o cilindro reserva. Se houver parada de planta, é necessário recondicioná-la, o que acarretaria em uma parada de produção de 2 horas. Se não houver cilindro reserva disponível, é necessário contabilizar o tempo de substituição do êmbolo e do cilindro, que é de 2 horas. Além do prejuízo de parada de produção, há dano do próprio êmbolo. Este sistema é redundante”. No corpo deste trabalho, por espaço limitado, optou-se por utilizar a forma simples de descrição dos efeitos dos modos de falha. Além disso, muitas dos efeitos se tornariam repetitivos, já que, como já citado, modos de falha diferentes podem ter o mesmo efeito. No Apêndice II, é possível obter uma descrição mais longa dos efeitos das falhas.

Tabela 4.2 - FMEA do Sistema de Bombeamento de Peróxido

MCC II PLANILHA DE INFORMAÇÃO		Sistema: Sistema de bombeamento de peróxido		
FUNÇÃO	FALHA FUNC.	MODOS DE FALHA	EFEITO DA FALHA (O que acontece quando falha)	
Sistema de Injeção	Injetar peróxido no reator à devida vazão	Nenhuma injeção de peróxido	Quebra do êmbolo	Falta de vazão de peróxido, causando perda da reação. Parada de produção: 4 horas.
			Quebra ou desencaixe do acoplamento do êmbolo	Falta de vazão de peróxido, causando perda da reação. Parada de produção: 4 horas.
			Travamento do êmbolo por falta de lubrificação	O êmbolo emperra, o que é facilmente observado e revertido. Parada de produção: não há.
			Obstrução na válvula de retenção da linha	Impossibilidade de injetar peróxido no reator, causando perda da reação. Com a obstrução da válvula de retenção, pode ocorrer rompimento de algum componente. Parada de produção: 4 horas.
			Obstrução na baioneta	Falta de vazão de peróxido, causando perda da reação. Gera sobrepressão na linha, rompendo o disco de ruptura. Parada de produção: 13 horas.
			Obstrução no orifício do medidor de vazão	Impossibilidade da bomba succionar o fluido, podendo causar perda de reação. Parada de produção: 8 horas.
	Injetar peróxido no reator à devida vazão	Injeção com vazão aquém da especificada	Obstrução parcial da baioneta	Falta de vazão de peróxido, causando perda da reação. Gera sobrepressão na linha, rompendo o disco de ruptura. Parada de produção: 12 horas.
			Obstrução parcial na válvula de retenção da linha de descarga	Impossibilidade de injetar peróxido no reator, causando perda da reação. Com a obstrução da válvula de retenção, pode ocorrer rompimento de algum componente. Parada de produção: 4 horas.
			Ajuste inadequado do <i>stroke</i> mecânico	Falta de vazão de peróxido, causando perda da reação e, possivelmente, parada da planta. Parada de produção: 4 horas.
			Calibração inadequada do atuador pneumático	Falta de vazão de peróxido, causando perda da reação. Parada de produção: 12 horas.
			Baixo nível de produto no vaso de sucção	Falta de vazão de peróxido, causando perda da reação e, possivelmente, parada de planta. Parada de produção: 6 horas.
			Obstrução parcial no filtro (sucção)	Fácil detecção. Filtro tem redundância, não parando a planta. Perda de produção: não há.
			Recirculação por falha nas válvulas de retenção	Falta de vazão de peróxido, causando perda da reação e, possivelmente, parada de planta. Parada de produção: 6 horas.
	Injetar peróxido no reator à devida vazão	Injeção com vazão além da especificada	Ajuste inadequado do <i>stroke</i> mecânico	Pode gerar decomposição. Parada de produção: 36 horas.
			Calibração inadequada do atuador pneumático	Pode gerar decomposição. Parada de produção: 36 horas. Falha não visível para o sistema de controle por temperatura.
	Conter peróxido	Não conter peróxido	Vazamento por conexões/linhas de alta pressão	Pode causar consequências à saúde, segurança e meio ambiente, dependendo da formulação do peróxido utilizado. Pode cessar a reação. Parada de produção: 8h.
			Vazamento através de trincas nos cilindros	Pode causar consequências à saúde, segurança e meio ambiente, dependendo da formulação do peróxido utilizado. Pode cessar a reação. Parada de produção: 4h.
			Vazamento através de trincas no corpo da monobloco	Pode causar consequências à saúde, segurança e meio ambiente, dependendo da formulação do peróxido utilizado. Pode cessar a reação. Parada de produção: 4h.
			Perda de estanqueidade - vedação haste/sede da monobloco	A reação poderá cessar. Causa perda de material e exige troca da válvula. Parada de produção: 8 horas.
			Vazamento através das gaxetas da monobloco	Pode causar consequências à saúde, segurança e meio ambiente, dependendo da formulação do peróxido utilizado. Pode cessar a reação. Parada de produção: 8h.
			Vazamento através da gaxeta do cilindro	Pode causar consequências à saúde, segurança e meio ambiente, dependendo da formulação do peróxido utilizado. Pode cessar a reação. Parada de produção: 4h.
Vazamento através de trincas nos componentes das válvulas de retenção			Pode causar consequências à saúde, segurança e meio ambiente, dependendo da formulação do peróxido utilizado. Pode cessar a reação. Parada de produção: 4h.	

Os modos de falha ocorrem com diferentes frequências. Por isso, no preparo da FMEA, decisões foram tomadas até o atingimento de modos de falha improváveis que podem ser ignorados com segurança total. Assim, listou-se somente os modos de falha razoavelmente prováveis de acontecer, incluindo falhas que ocorreram antes nos ativos ou em ativos similares, modos de falha que já são temas de rotinas de manutenção proativa e quaisquer outros modos de falha que ainda não ocorreram, mas têm possibilidades reais de acontecer. Na decisão de não listar um modo de falha considerou-se as consequências da falha. Ou seja, falhas cujas consequências seriam muito severas foram listadas, mesmo que elas tivessem pequena probabilidade de ocorrer, para que fossem sujeitas a análises posteriores.

É comum encontrar FMEA onde se calcula o número de prioridade de risco, através da ocorrência da falha, severidade da falha e detecção da falha. Neste caso, os modos de falha com maiores riscos são prioritários para a recomendação de ações corretivas. A MCC utiliza uma forma mais simplificada da FMEA, onde os modos de falha apresentados são considerados importantes e passíveis de análise, já que não é um estudo para ações imediatas. Por isso, na presente análise, não se utilizou o número de prioridade de risco. Assim, foram estudados os efeitos dos trinta e oito modos de falha estabelecidos, conforme a Tabela 4.2 e o Apêndice I.

Alguns equipamentos, tais como válvula de retenção, êmbolos, cilindros, filtros, cilindro intensificador, possuem redundância, ou seja, possuem reservas que podem ser acionados em caso de falha. No entanto, caso o tempo entre a percepção da falha e o acionamento do componente reserva seja grande a ponto de não se conseguir evitar uma parada de planta, é necessário considerar o tempo de religamento da planta. Para itens que não possuem redundância, tais como atuador, bomba hidráulica, baioneta, vaso de sucção, conjunto de válvulas monobloco, é necessário considerar o tempo de reparo em adição ao tempo de partida da planta. O tempo de partida da planta pode variar de 2 horas, quando a partida é simples, a 36 horas, quando há decomposição. A decomposição é uma reação em cadeia explosiva que acontece devido a uma alteração no balanço energético, causada por perturbações (contaminantes, pontos quentes nos reatores, aumento na injeção do iniciador, neste caso o peróxido, na pressão e na temperatura da reação). Ela pode acarretar em consequências ambientais, de pessoas e de material. Exemplos de modos de falha que podem levar à decomposição são os relacionados à falha “Injeção com vazão além da especificada”.

4.4 Análise das consequências das falhas

O diagrama lógico de decisão proposto por Moubray, 2003, mostrado em Anexo, ajuda na seleção da rotina de manutenção mais adequada (se houver alguma), sua frequência e por quem deve ser feita. Para tal, inicialmente é necessário analisar as consequências das falhas, através das perguntas iniciais do diagrama (perguntas inseridas nas caixas pretas, no nível superior do diagrama).

Assim, utilizando o diagrama lógico de decisão citado, dividiu-se as falhas, através da análise de seus efeitos, em ocultas e evidentes. A falha evidente é aquela que alguém certamente saberá quando ela ocorreu. Já as falhas ocultas são aquelas que ocorrem de tal forma que ninguém sabe que o item está em estado de falha, a menos que uma outra falha ocorra. Conforme a MCC proposta por Moubray, 2003, as falhas ocultas são identificadas pela letra H (conforme diagrama).

As falhas evidentes foram classificadas em três categorias, em ordem decrescente de importância:

- Segurança ou consequências ambientais (S): quando a falha causa ferimento ou morte de alguém ou afeta qualquer padrão ambiental, nacional ou regional. Ou seja, quando a resposta é “Sim” para a pergunta S ou para a pergunta E do diagrama;
- Consequências operacionais (O): quando afeta produção, qualidade do produto, serviço de atendimento ao usuário ou custos operacionais. Ou seja, quando a resposta é “Sim” para a pergunta O do diagrama;
- Consequências não operacionais (N): quando não afetam a segurança nem a produção, envolvendo somente o custo direto do reparo. Ou seja, quando a resposta à pergunta O do diagrama é “Não”.

Colocar as falhas evidentes nesta ordem significa priorizar saúde, segurança e meio ambiente em detrimento da produção. No diagrama lógico da MCC, não se admite que uma falha com consequências de segurança ou consequências ambientais tenha uma manutenção corretiva. Se uma tarefa preventiva não puder ser realizada, o reprojeto é compulsório.

O resultado da análise das consequências das falhas é apresentado no subcapítulo 4.6, na Tabela 4.4, através da letra inicial na coluna de “Resultado Árvore Lógica”. Por exemplo, para o modo de falha “Quebra do Êmbolo”, a coluna “Resultado Árvore Lógica” apresenta “O2 – Restauração Programada”. A letra inicial O significa que o modo de falha “Quebra do Êmbolo” tem consequências operacionais. Seguindo esta mesma lógica, tem-se que o modo de falha

“Travamento do êmbolo por falta de lubrificação” não tem consequências que afetam segurança ou meio ambiente, nem operacional. Já o modo de falha “Vazamento por conexões/linhas de alta pressão” apresenta consequências de segurança ou consequências ambientais. Não foram encontradas falhas ocultas no sistema de bombeamento de peróxido.

4.5 Análise de Weibull na MCC

Para efeitos de exemplificação do uso da análise de Weibull na MCC, foram escolhidos os cilindros como objetos do estudo, por terem o maior número de dados de falha disponível e por ser um dos componentes do equipamento que mais falha. Reunindo as informações de falhas nos cilindros de cinco bombas, de junho de 2014 a outubro de 2018, chega-se ao conjunto de dados da entrada da análise que consta na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Dados de entrada para Análise de Weibull das falhas nos cilindros

Identificação cilindro	Data instalação	Tempo de operação (dias)	Identificação cilindro	Data instalação	Tempo de operação (dias)	Identificação cilindro	Data instalação	Tempo de operação (dias)
C1SE	26/12/2016	661	C3NE	01/06/2014	605	C5SE	20/07/2015	273
C1SO	26/12/2016	388	C3NE	27/01/2016	651	C5SE	18/04/2016	330
C1SE	18/10/2016	69	C3NO	01/06/2014	686	C5SE	14/03/2017	208
C1SE	18/10/2016	69	C3SE	31/01/2017	247	C5SO	01/06/2014	383
C1NE	17/03/2017	46	C3SO	24/04/2015	895	C5SO	19/06/2015	686
C1NO	17/03/2017	19	C3NO	17/04/2016	536	C5NE	01/06/2014	396
C1NO	05/04/2017	210	C4SE	01/06/2014	1037	C5NE	02/07/2015	62
C1NE	02/05/2017	183	C4SO	01/06/2014	1110	C5NE	02/09/2015	559
C2SE	01/06/2014	1138	C4SO	15/06/2017	353	C5NE	14/03/2017	34
C2SO	01/06/2014	1138	C4NE	01/06/2014	705	C5NE	17/04/2017	174
C2NE	01/06/2014	778	C4NE	06/05/2016	235	C5NO	01/06/2014	374
C2NE	18/07/2016	221	C4NE	27/12/2016	321	C5NO	10/06/2015	643
C2NO	01/06/2014	997	C4NO	01/06/2014	850	C5NE	02/07/2015	62
C3SE	01/06/2014	975	C4NO	28/09/2016	406			
C3SO	01/06/2014	327	C5SE	01/06/2014	414			

Cada uma das cinco bombas (C1, C2, C3, C4 e C5) possui quatro cilindros (SE, SO, NE e NO). A Tabela 4.3 mostra o tempo de operação, em dias, de cada um dos cilindros, a partir da data de instalação até a data de falha. Esses tempos de operação são os dados de entrada do software utilizado para o cálculo dos parâmetros e determinação das curvas de confiabilidade. O software utilizado foi *ReliaSoft Weibull ++*®. O software analisa qual distribuição melhor se adequa aos dados de entrada (log-normal, exponencial, Weibull, gama, entre outras). A partir dos dados da Tabela 4.3, o software selecionou a distribuição de Weibull, utilizando 2 parâmetros, conforme mostra a Figura 4.2.

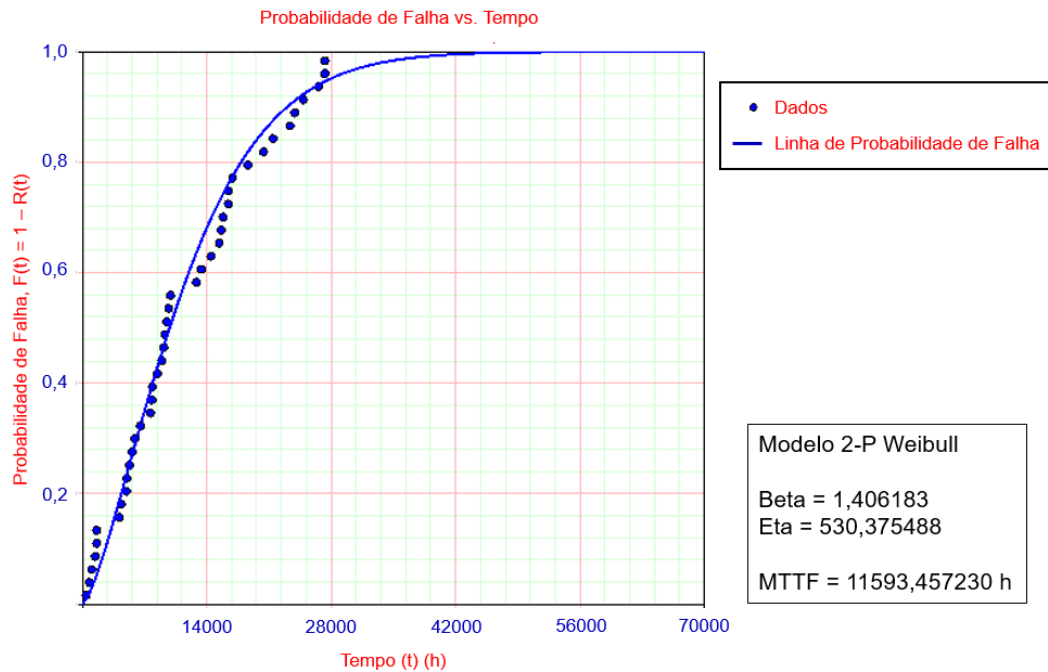


Figura 4.2 - Análise de Weibull para os cilindros: Probabilidade de Falha vs. Tempo

A partir deste estudo, com Beta aproximadamente igual a 1,4 (maior do que 1), percebe-se que as falhas nos cilindros acontecem por desgaste, com taxa de falha crescente no tempo. O tempo médio entre falhas (MTTF) encontrado foi de aproximadamente 11600 horas. Neste caso, vale a pena estabelecer um limite de tempo de operação para os cilindros, já que a probabilidade de falha é crescente durante todo o período de operação. Estes resultados foram considerados para a criação da estratégia de manutenção dos cilindros, apresentada a seguir neste trabalho.

4.6 Planejamento de tarefas de manutenção

A classificação das tarefas de manutenção, proposta por Moubray, 2003, pode ser vista na Figura 4.3. Mais uma vez, é o diagrama lógico, apresentado em Anexo, que auxilia na compreensão da tarefa de manutenção mais adequada.

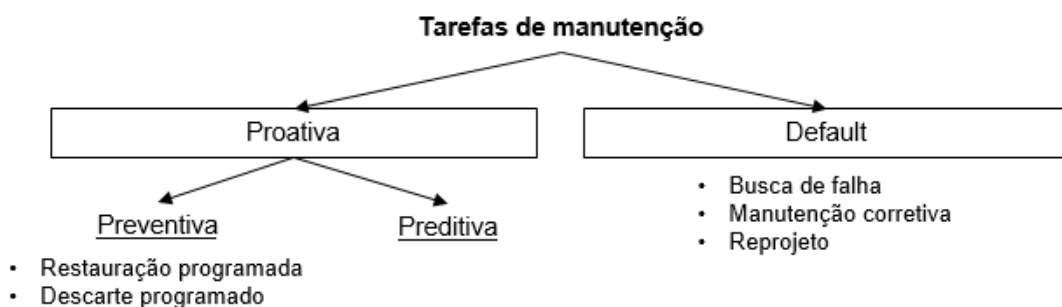


Figura 4.3 - Classificação das tarefas de manutenção

As tarefas proativas foram subdivididas em preditivas e preventivas. As preditivas (ou baseadas na condição) são aquelas nas quais o desempenho ou condição do equipamento é periodicamente medido (de forma contínua ou a intervalos especificados de medição). De acordo com algum padrão ou limite pré-estabelecido, uma ação é tomada para se restaurar ou substituir o equipamento antes da ocorrência de uma falha completa. O fundamento deste tipo de manutenção é que a maioria das falhas não ocorrem instantaneamente, mas desenvolvem-se ao longo de um período de tempo. A falha potencial é uma condição física capaz de indicar que uma falha funcional está ocorrendo ou está prestes a ocorrer. Alguns exemplos de falhas

potenciais são trincas indicando fadiga do metal, vibrações indicando falha iminente, desgastes, entre outros. Tarefas baseadas na condição consistem em checar o equipamento continuamente, buscando sintomas que indiquem falhas potenciais de modo que ações possam ser tomadas no sentido de prevenir a falha funcional ou mitigar/evitar as consequências da falha.

A Tabela 4.4 mostra a estratégia de manutenção mais indicada para cada um dos modos de falha do sistema de injeção. Pode-se perceber, na coluna “Resultado da Árvore Lógica”, que seis modos de falha obtiveram como melhor estratégia a ser adotada a tarefa sob-condição programada (aquelas que seguem a letra indicativa do tipo de consequência da falha com o número 1). A tabela também mostra a tarefa proposta, consequência das reflexões trazidas pelo diagrama lógico e da experiência dos profissionais envolvidos na confecção do plano de manutenção. Para tarefas baseadas na condição, determinou-se tarefas de inspeção. Tarefas de inspeção semanais já estão na rotina de trabalho da Manutenção. Assim, sua frequência e responsável foram mantidos.

Tabela 4.4 - Resultados das análises dos efeitos das falhas e tarefas propostas

MCC II - PLANILHA DE DECISÃO		Sistema: Sistema de bombeamento de peróxido			
	MODO DE FALHA	RESULTADO ÁRVORE LÓGICA	TAREFA PROPOSTA	FREQ.	RESP.
Sistema de Injeção	Quebra do êmbolo	O2 - Restauração programada	Restaurar êmbolo e cilindro.	12000h	Manut.
	Quebra ou desencaixe do acoplamento do êmbolo	O3 - Descarte programado	Substituir o sistema de fixação.	16000h	Manut.
	Travamento do êmbolo por falta de lubrificação	N2 - Restauração programada	Restaurar bomba lubrificação.	16000h	Manut.
	Obstrução na válvula de retenção da linha	O2 - Restauração programada	Restaurar a válvula de retenção.	5000h	Manut.
	Obstrução na baioneta	O - Nenhuma manut. programada	-	-	-
	Obstrução no orifício do medidor de vazão	O - Nenhuma manut. programada	-	-	-
	Ajuste inadequado do stroke mecânico	S1 - Sob condição programada	Avaliar ajuste do stroke mecânico quando da sua instalação.	Variável	-
	Calibração inadequada do atuador pneumático	S1 - Sob condição programada	Avaliar calibração do atuador quando da sua instalação.	Variável	-
	Baixo nível de produto no vaso de sucção	O - Nenhuma manut. programada	-	-	-
	Obstrução parcial no filtro (sucção)	N - Nenhuma manut. programada	-	-	-
	Recirculação por falha nas válvulas de retenção	O2 - Restauração programada	Restaurar a válvula de retenção.	5000h	Manut.
	Vazamento por conexões/linhas de alta pressão	S1 - Sob condição programada	Inspeccionar linhas.	Semanal	Manut.
	Vazamento através de trincas nos cilindros	S2 - Restauração programada	Restaurar cilindro.	12000h	Manut.
	Vazamento através de trincas no corpo da monobloco	S1 - Sob condição programada	Inspeccionar a válvula monobloco.	Semanal	Manut.
	Perda de estanqueidade - vedação haste/sede da monobloco	S1 - Sob condição programada	Inspeccionar a válvula monobloco.	Semanal	Manut.
	Vazamento através das gaxetas da monobloco	S1 - Sob condição programada	Inspeccionar a válvula monobloco.	Semanal	Manut.
	Vazamento através da gaxeta do cilindro	S3 - Descarte programado	Substituir engaxetamento dos cilindros.	12000h	Manut.
Vazamento através de trincas nos componentes das válvulas de retenção	S2 - Restauração programada	Restaurar válvula de retenção.	5000h	Manut.	

As tarefas preventivas (ou baseadas no tempo) são realizadas com base unicamente em uma periodicidade fixa e previamente estabelecida para cada tarefa específica. Para empregar adequadamente o uso deste tipo de manutenção, é necessário conhecer com boa precisão o comportamento temporal dos modos de falha, de modo que podemos determinar precisamente o que e quando deve ser feito, evitando, assim, a ocorrência de falhas. Tarefas do tipo baseada no tempo podem ser de dois tipos: recondição programada (restauração programada) ou substituição programada (descarte programado). No sistema de injeção, foram determinados

oito modos de falha para os quais tarefas preventivas foram as mais adequadas, conforme pode ser visto na tabela acima. Os números 2 e 3, que seguem a letra que indica o tipo de consequência da falha na coluna “Resultado Árvore Lógica”, indicam que a tarefa mais indicada é do tipo baseada no tempo, sendo que o número 2 indica uma tarefa de restauração e o número 3 indica uma tarefa de descarte. Se uma tarefa de restauração não vale a pena ser feita, o item é descartado e substituído por um novo, como é o caso do acoplamento do êmbolo no modo de falha “Quebra ou desencaixe do acoplamento do êmbolo”. Sabe-se que o desencaixe acontece por algum desgaste no acoplamento. Assim, é necessária substituição deste sistema de fixação de tempos em tempo. A frequência foi estabelecida com base no que recomenda o fabricante da bomba (a cada 16000 horas de operação).

Tarefas default correspondem às decisões do que fazer quando uma tarefa proativa não for aplicável tecnicamente e não for eficaz. Elas se subdividem em tarefas de busca de falhas, reprojeto e manutenção corretiva. A tarefa de busca de falhas consiste em uma verificação periódica das funções ocultas para verificar se a falha já ocorreu. Caso positivo, uma ação corretiva deve ser tomada. Visa, então, evitar falha múltipla. A busca de falhas se aplica somente para falhas ocultas ou não reveladas. Como não se encontrou falhas ocultas neste trabalho, não há tarefas de manutenção de busca de falhas.

O reprojeto é a mudança estrutural, na capacidade intrínseca do sistema. São medidas de modificações estruturais no sistema tomadas quando a manutenção não é aplicável tecnicamente ou não é custo-eficiente, ao mesmo tempo que as consequências da falha são inaceitáveis. Não foi encontrada necessidade de reprojeto ao longo deste estudo.

A manutenção corretiva (estratégia *run to failure*) ocorre quando nenhuma manutenção é programada, sendo incluída racionalmente no plano de manutenção. Para o sistema de injeção mostrado na tabela acima, foram encontrados quatro modos de falha para os quais o melhor tipo de manutenção é a corretiva (nenhuma manutenção programada). Estes modos de falha podem ser corrigidos apenas depois da falha porque não apresentam consequências graves e têm baixa ocorrência, além de serem facilmente contornáveis.

Na Tabela 4.4, alguns modos de falha foram suprimidos, já que se repetiam para diferentes falhas. A tabela de resultados das análises dos efeitos das falhas e tarefas propostas para o sistema hidráulico está no Apêndice III.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O objetivo deste trabalho era elaborar um plano de manutenção para o sistema de bombeamento de peróxido, que inclui sistema de injeção e sistema hidráulico. O plano de manutenção, com tarefas propostas, frequência das tarefas e equipe responsável pelas mesmas está apresentado na Tabela 5.1.

Em suma, os tipos de tarefas de manutenção deste trabalho foram divididos em restauração programada, descarte programado, sob-condição programada ou manutenção corretiva (nenhuma manutenção programada).

Atualmente, a abordagem da manutenção é corretiva e preventiva (quando há restauração de componentes em paradas gerais de manutenção, lubrificações e inspeções). Nestes casos, aproveita-se a parada da planta para restaurações ou substituições dos itens. Além disso, são feitas manutenções corretivas. Ou seja, espera-se o equipamento falhar e, muitas vezes, parar a produção, para corrigir os equipamentos.

Anteriormente a este estudo, havia sido feito um estudo para determinar os *bad actors* do sistema, ou seja, aqueles componentes que mais demandam da equipe de manutenção. São eles: micro de reversão, válvula de retenção, cilindros e acoplamento do êmbolo. Estes itens tiveram uma atenção especial quanto ao estudo da frequência de suas manutenções. Para determinar a frequência de suas manutenções foram utilizados estudos de confiabilidade, através de software, com uso da distribuição de Weibull, a experiência da equipe envolvida e as recomendações de manutenção do fabricante.

Tabela 5.1 - Plano de manutenção do sistema de bombeamento de peróxido

PLANO DE MANUTENÇÃO - SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE PERÓXIDO		
TAREFA PROPOSTA	FREQ.	RESP.
Sistema de injeção		
Restaurar êmbolo e cilindro e substituir engaxetamento do cilindro.	12000h	Manutenção
Substituir o sistema de fixação do êmbolo.	16000h	Manutenção
Restaurar válvula de retenção.	5000h	Manutenção
Inspeccionar linhas de alta pressão e válvula monobloco. Inspeccionar e, caso necessário, ajustar o engaxetamento dos cilindros.	Semanal	Manutenção
Sistema hidráulico		
Verificar vazamentos e avaliar e calibrar a válvula de controle de pressão. Avaliar cilindro intensificador, verificando necessidade de substituição dos reparos de vedação. Avaliar linhas e conexões, verificando necessidade de substituição/reaperto. Restaurar a bomba de lubrificação dos êmbolos, a bomba auxiliar, a bomba principal e a bomba de óleo de comando. Restaurar ou substituir, caso necessário, as válvulas direcionais. Limpar os trocadores de calor.	6 anos	Manutenção
Fazer análise de vibração, verificando necessidade de reparo/substituição do motor elétrico.	15 dias	Preditiva
Inspeccionar a micro de reversão, avaliando necessidade de ajuste/substituição.	Semanal	Manutenção

Apesar dos benefícios oferecidos pela metodologia, tais como maior conhecimento do equipamento e um plano de manutenção bem fundamentado, não se pode deixar de citar suas falhas. Uma delas é quanto à frequência de manutenção dos componentes do sistema. Sabe-se que restaurações nem sempre deixam o item tão bom quanto como se ele fosse novo. Um exemplo disso são lapidações de um item, que retiram descontinuidades, mas diminuem a sua espessura. Nestes casos, o melhor seria ter uma frequência de manutenção diminuída cada vez que um novo reparo ocorre. No entanto, isso não invalida o método.

Optou-se por agrupar as tarefas de manutenção nos dois subsistemas estudados e, dentro de cada um deles, pela frequência de manutenção, já que atividades de uma mesma frequência podem ser realizadas juntas.

6 CONCLUSÕES

Após o processo de estudo a aplicação da MCC, fica evidente o conhecimento gerado e registrado sobre o equipamento em estudo. Foi gerado um plano de manutenção bem estruturado e argumentado, sendo o método compreendido pela equipe, conforme era o objetivo deste trabalho. Através do diagrama lógico de decisão, foram selecionadas tarefas aplicáveis e racionais, baseada nas consequências das falhas.

Ficou claro também que a MCC não é uma técnica a ser aplicada em todos os equipamentos, visto que é uma metodologia trabalhosa. Ou seja, deve-se aplicar a MCC somente em equipamentos selecionados, aqueles que geram maiores perdas produtivas ou que apresentam riscos à saúde, segurança ou meio ambiente.

Pode-se comparar a manutenção com o ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*). Este trabalho apresenta o planejamento de manutenção, utilizando o método da MCC. Antes de iniciar a execução do plano gerado, é necessário orientar a equipe de manutenção, para garantir que o plano seja seguido. O próximo passo seria colocar o plano em prática, executando as manutenções preditivas e preventivas. Durante sua execução deverá se assegurar o monitoramento dos seus resultados (neste caso, o monitoramento das falhas, suas causas e frequências), para que a fase da verificação tenha validade, através de métodos estatísticos. Por fim, deverá se verificar as melhorias para o plano de manutenção apresentado neste trabalho. Melhorias no plano de manutenção sempre devem ser implementadas e novos modos de falha sempre podem surgir, gerando a necessidade de sua revisão periódica. Além disso, novas

técnicas de inspeção e monitoramento podem surgir, podendo ser acrescentadas ao plano de manutenção preditiva.

Para o futuro, será necessário revisitar a política de sobressalentes dessas bombas, garantindo que os mecânicos estarão bem atendidos neste quesito quando do restauro ou substituição dos equipamentos. Recomenda-se revisar todos os itens da bomba para verificar a real necessidade de tê-los em estoque e a sua respectiva quantidade. Espera-se implementar o plano de manutenção em breve. É necessário o acompanhamento das falhas, bem como seu registro. Assim, futuramente, será possível analisar os resultados deste plano de manutenção. Não se pode esquecer de que a MCC é um documento vivo, que precisa de melhoria contínua e constantes revisões.

Os resultados deste trabalho, quanto ao aumento do MTTF do equipamento, maiores índices de confiabilidade e disponibilidade só poderão ser medidos após a implementação e tempo de aquisição de novos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **“NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade”**. 1994.

Fogliatto, F.S., Ribeiro, J. L. D. **“Confiabilidade e Manutenção Industrial”**. Elsevier, 2009.

Knight, C.R. **“Four decades of reliability progress”**. IEEE Reliability Society, 1991.

Lafraia, J.R.B. **“Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade”**. Qualitymark, 5ª reimpressão, 2014.

Moubray, J. **“Manutenção Centrada em Confiabilidade”**. Edição brasileira. Editora Aladon, 2ª impressão, 2003.

Monchy, F. **“A função manutenção - Formação para a gerência da manutenção industrial”**. Editora Durban, 1989.

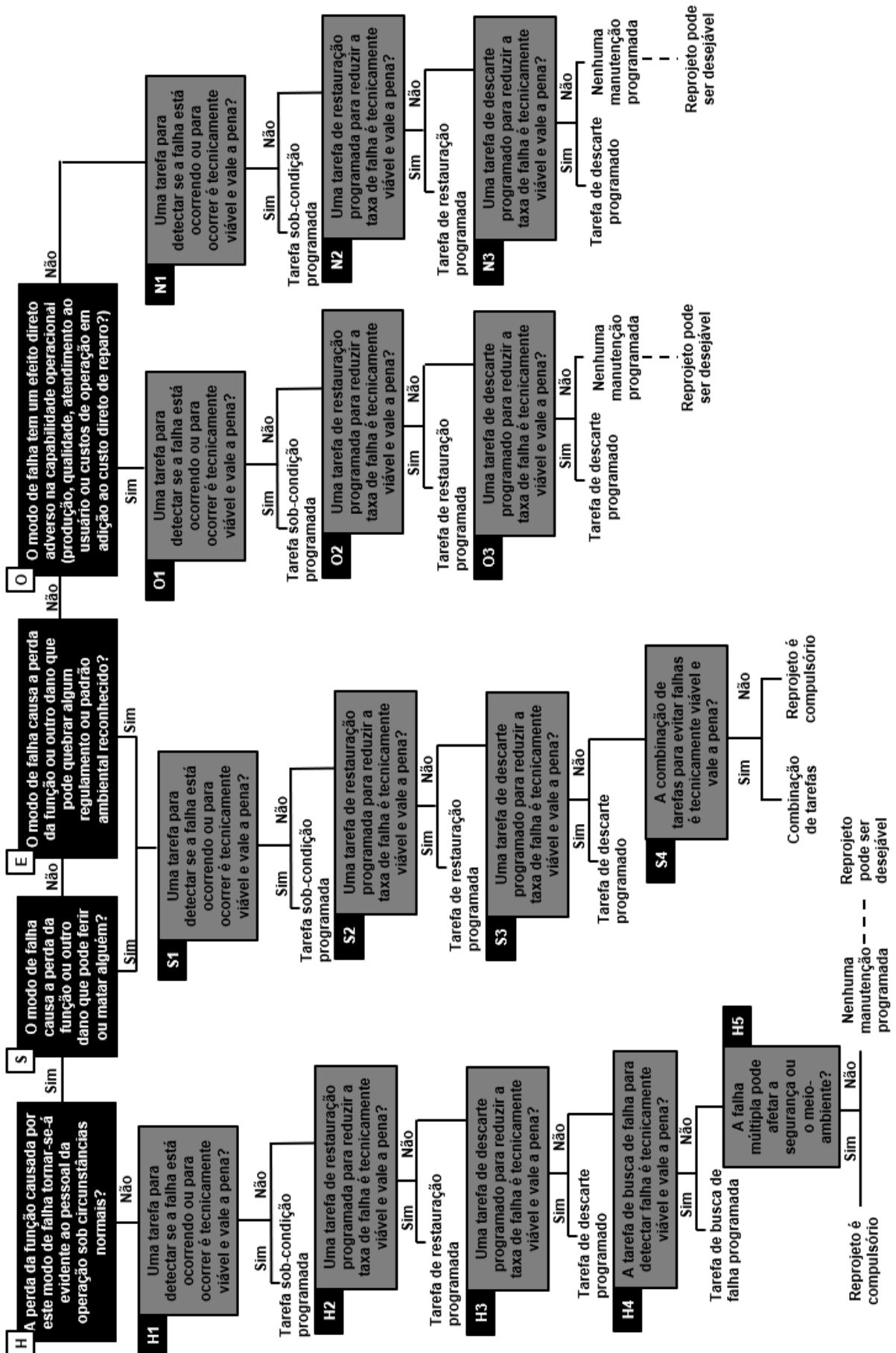
Nóbrega, P.R.L. **“Manutenção de compressores alternativos e centrífugos”**, Ed. Synergia, 2011.

Nowlan, F.S., Heap, H.F. **“Reliability-Centered Maintenance”**. United Airlines, 1978.

Siqueira, I. P. **“Manutenção Centrada na Confiabilidade – Manual de Implementação”**. Qualitymark, 2005.

Viana, H. R. G. **“Planejamento e Controle da Manutenção”**. Qualitymark Editora Ltda, 2002.

ANEXO – Diagrama lógico da MCC. Fonte: Moubray, 2003, página 200.



APÊNDICES

Apêndice I – FMEA do Sistema Hidráulico

MCC II PLANILHA DE INFORMAÇÃO		Sistema: Sistema de bombeamento de peróxido	
FUNÇÃO	FALHA FUNC.	MODO DE FALHA	EFEITO DA FALHA (O que acontece quando falha)
Conter o óleo utilizado no acionamento do sistema injetor	Não conter óleo - campo ou painel	Falha na válvula de controle de pressão	Pode haver vazamento pelas conexões ou ruptura de linha. Parada de produção: 8 horas.
		Vazamento no cilindro intensificador	Vazamento de óleo na área operacional. Em caso de vazamento excessivo, pode levar à parada do sistema. Parada de produção: 16 horas.
		Vazamento por conexões	Vazamento de óleo na área operacional. Em caso de vazamento excessivo, pode levar à parada do sistema. Parada de produção: 8 horas.
		Vazamento na bomba de lubrificação dos êmbolos	Vazamento de óleo na área operacional. Em caso de vazamento excessivo, pode levar à parada do sistema à falta de lubrificação nos êmbolos, gerando potenciais danos, custos de reparo e tempo para substituição. Parada de produção: 10 horas.
		Vazamento na válvula direcional manual	Vazamento de óleo na área operacional. Em caso de vazamento excessivo, pode levar à parada do sistema. Parada de produção: 8 horas.
		Vazamento na bomba auxiliar	Vazamento de óleo na área operacional. Em caso de vazamento excessivo, pode levar à parada do sistema. Parada de produção: 8 horas.
		Vazamento na bomba principal	Vazamento de óleo na área operacional. Em caso de vazamento excessivo, pode levar à parada do sistema. Parada de produção: 24 horas.
Sist. Hidráulico Pressurizar o sistema de injeção	Não pressurizar o sistema de injeção	Recirculação interna no cilindro intensificador	Folgas e desalinhamentos no cilindro intensificador impedem que a pressão do sistema hidráulico seja devidamente passada ao sistema injetor. Pode causar perda de reação. Pode-se apenas reverter o cilindro. Parada de produção: não há.
		Falha na bomba do óleo de comando	A falha e indisponibilidade da bomba do comando de óleo, responsável pelo controle e inversão hidráulica dos cilindros, causa a falha funcional do sistema hidráulico. Pode levar à perda de reação. Parada de produção: 24 horas.
		Falha na bomba principal	Falha funcional do sistema hidráulico. Possível perda de reação. Parada de produção: 24 horas.
		Falha mecânica de motor elétrico	Uma falha mecânica, como falha nos rolamentos do motor, indisponibiliza o acionamento das bombas do sistema hidráulico. Pode causar queda da reação. Parada de produção: 12 horas.
		Falha elétrica (motor, gaveta e conexões)	Uma falha elétrica, como entrada de água no motor, falha no isolamento (fuga para a carcaça), problema na gaveta, dentre outras, ocasiona a indisponibilidade do sistema hidráulico. Pode causar perda de reação. Parada de produção: 12 horas.
		Travamento/não acionamento na micro de reversão	O travamento da micro de reversão indisponibiliza o sistema de controle hidráulico, impossibilitando a reversão do curso dos cilindros. Pode causar perda de reação. Parada de produção: 8 horas.
		Nível baixo no tanque de armazenamento de óleo	A falta de óleo impossibilita o acionamento do sistema injetor. Pode causar perda de reação. Parada de produção: 4 horas.
		Superaquecimento do sistema hidráulico	O superaquecimento do sistema, causado pela falha no trocador de calor, causa instabilidade no sistema hidráulico, deixando-o suscetível a falhas. Pode causar perda de reação. Parada de produção: 12 horas.
		Recirculação interna nas válvulas direcionais	Folgas e desalinhamentos nas válvulas direcionais impedem o controle devido do cilindro intensificador. Pode causar perda de reação. Parada de produção: 10 horas.
		Falha na barreira conversora	Parada de produção: 8 horas
		Ajuste indevido do intertravamento	Parada de produção: 4 horas
		Falha de sinal	Parada de produção: 4 horas

Apêndice II – Descrição dos modos de falhas e seus efeitos

- A quebra ou desencaixe do acoplamento do êmbolo faz com que o mesmo não mais tenha movimento, deixando de pressurizar o fluido de trabalho*. A máquina para pelo descontrole de vazão (malha de controle). A quebra é percebida visualmente, pelo operador. Um possível vazamento de produto pela vedação será direcionado para local adequado. Há cilindro reserva. Possivelmente, será necessário partir a planta novamente (parada de produção de 2 horas). Caso o cilindro reserva não esteja disponível, deve-se contar o tempo de substituição do sistema de fixação (2 horas).
- A falta de lubrificação do êmbolo causa aumento do atrito entre o êmbolo e o cilindro e, com contato excessivo, ocorre o travamento do mesmo*. A falha pode ser percebida por ruído e por aquecimento (sensitivo). O conjunto êmbolo-cilindro é redundante, por isso, a situação é facilmente revertida. Não há parada de produção.
- A obstrução total ou parcial em uma válvula de retenção causa a impossibilidade de injetar peróxido no reator*. Com a obstrução da válvula, uma sobrepressão na descarga do cilindro é formada, possibilitando o rompimento de componentes. Ocorre dano na válvula. A malha de controle faz com que a máquina pare. A obstrução é percebida devido à variação de pressão de descarga no momento da injeção. Pode ter vazamento de produto pela vedação da válvula, por excesso de pressão, que vai ser direcionado para local adequado. Manualmente, é possível passar a operação para um cilindro reserva. Provavelmente, não terá tempo hábil para esta reversão. Neste caso, será necessário partir a planta novamente (parada de produção de 2h). Se não houver possibilidade de reversão, conta-se o tempo de substituição da válvula de retenção, que é de 2 horas.
- A obstrução total ou parcial da baioneta causa a impossibilidade de injetar peróxido no reator*. Pode ocorrer rompimento do disco de ruptura, devido à sobrepressão gerada na linha. A baioneta não é redundante. A manutenção depende da liberação do reator (aproximadamente total de 5 horas). Neste caso, o tempo de partida da planta é de 8 horas. Assim, a parada de produção totaliza em 13 horas.
- A obstrução no medidor de vazão causa a impossibilidade da bomba succionar o fluido*. O medidor de vazão não é redundante. O tempo de manutenção é de 4 horas e o tempo de partida também, totalizando 8 horas de parada de produção.
- O ajuste inadequado do stroke mecânico é uma falha de montagem. Isso significa um ajuste incorreto do espaço morto do cilindro, causando injeção irregular do produto e variação da vazão no sistema de controle para compensação*. Se o ajuste incorreto causar uma injeção de peróxido no reator com uma vazão aquém da especificada, o tempo de parada de produção é de 4 horas. Se a vazão for além da específica, pode gerar uma decomposição. Neste caso, o tempo de parada de produção é de 36 horas.
- A recorrência de calibração incorreta do posicionador do atuador pneumático é que as variações de vazão de injeção solicitadas pelo sistema de controle em função da temperatura não surtem o devido efeito no sistema hidráulico e, conseqüentemente, na injeção. Se houver decomposição (no caso de injeção de vazão além da especificada, a parada de produção pode chegar a 36 horas).
- O baixo nível de produto no vaso de sucção é uma falha na rotina da operação. O tempo de reabastecimento é de 2 horas e o tempo de partida da planta é de 4 horas, totalizando uma parada de produção de 6 horas.
- A obstrução parcial do filtro de sucção não gera grandes problemas, pois a produção não para, já que o filtro é redundante e de fácil inversão de operação.
- A recirculação por falha nas válvulas de retenção é provocada pela falta de estanqueidade. Neste caso, a bomba tenta suprir a vazão perdida, podendo não atingir o objetivo*. Pode levar a uma parada de produção de 6 horas.
- Trincas no sistema e junções mal alinhadas no sistema causam vazamento de peróxido para a atmosfera (vazamentos por conexões/linhas de alta pressão, através de trincas nos cilindros, através de trincas nas válvulas, através de gaxetas). Vazamento de peróxido na área operacional pode causar conseqüências à saúde, segurança e meio ambiente. Dependendo da formulação do peróxido utilizado, são possíveis riscos decorrentes do vazamento:

H225: líquido e vapores altamente inflamáveis.

H226: líquido e vapores inflamáveis.

H227: líquido combustível.

H242: pode incendiar sob ação do calor.

H315: provoca irritação à pele.

H317: pode provocar reações alérgicas na pele.

H320: pode provocar irritação ocular.

H332: nocivo, se inalado.

H400: muito tóxico para organismos aquáticos.

H410: muito tóxico para organismos aquáticos.

H412: muito tóxico para organismos aquáticos com efeitos prolongados.

Caso o vazamento seja significativo e não possa ser compensado pelo aumento de vazão da bomba, que será induzido pela queda de temperatura do ponto de injeção, a reação poderá cessar. O tempo mínimo de reparo é de 2 horas ou 4 horas, dependendo de onde acontecer o vazamento, mais o tempo de partida da planta (4 horas).

- Uma falha na válvula de controle de pressão pode acarretar em vazamentos pelas conexões ou ruptura da linha. Pode ser percebido visualmente ou pela parada da bomba pela malha de controle. A calibração ou troca da válvula leva 4 horas e o tempo de partida da planta também é de 4 horas.
- Um vazamento de óleo na área operacional (pelo cilindro intensificador, por conexões, por bombas, por válvulas) tem baixo risco à segurança e ao meio ambiente. O produto é pouco tóxico, podendo causar irritação aos olhos e, em contato prolongado e repetitivo, dermatite. Devido à presença de aditivos pode causar efeitos imprevisíveis em longo prazo no ambiente aquático. Em caso de vazamento excessivo, pode levar à parada do sistema e, conseqüentemente, perda da reação. O tempo de parada depende de onde está ocorrendo o vazamento, podendo chegar a 24 horas se o vazamento for na bomba principal.
- Folgas e desalinhamentos no cilindro intensificador impedem que a pressão do sistema hidráulico seja devidamente passada ao sistema injetor. A falha no sistema de acionamento faz com que os cilindros não mais comprimam o peróxido, causando a não injeção que, se não revertida rapidamente, leva à queda de temperatura e perda de reação. O cilindro tem redundância, mas em caso de ser necessária a manutenção imediata, ela leva cerca de 12 horas, podendo levar a uma parada de produção de 16 horas.
- A falha e indisponibilidade da bomba do óleo de comando, responsável pelo controle e inversão hidráulica dos cilindros, causa a falha funcional do sistema hidráulico. Pode levar à perda de reação. Em caso de parada, o tempo de perda de produção é de 24 horas (manutenção e partida da planta).
- A falha e indisponibilidade da bomba principal, responsável pelo acionamento do sistema injetor, causa a falha funcional do sistema hidráulico. A parada de produção, caso ocorra parada da planta, é de 24 horas.
- Uma falha mecânica no motor, como falha nos rolamentos, indisponibiliza o acionamento das bombas do sistema hidráulico. A substituição do motor por um reserva leva cerca de 8 horas e o tempo de partida da planta é de 4 horas.
- Uma falha elétrica no motor, como entrada de água no motor, falha no isolamento (fuga para a carcaça), problema na gaveta, dentre outras, ocasiona a indisponibilidade do sistema hidráulico. A pane elétrica faz com que o sistema hidráulico (e por conseqüência também o sistema de injeção) não sejam acionados, causando queda da temperatura na reação e, caso não evitada pela operação, perda da mesma. O tempo total de parada de produção é de 12 horas.
- O travamento da micro de reversão indisponibiliza o sistema de controle hidráulico, impossibilitando a reversão do curso dos cilindros*. A micro de reversão é redundante. Parada de produção pode chegar a 8 horas.

*A falta de vazão de peróxido ocorrida causa uma queda de temperatura na reação que, se não revertida, causa sua cessão.

Apêndice III – Resultados das análises dos efeitos das falhas e tarefas propostas

MCC II - PLANILHA DE DECISÃO		Sistema: Sistema de bombeamento de peróxido			
	MODO DE FALHA	RESULTADO ÁRVORE LÓGICA	TAREFA PROPOSTA	FREQ.	RESP.
Sistema Hidráulico	Falha na válvula de controle de Pressão	S2 - Restauração programada	Avaliar válvula de controle de pressão, verificar vazamentos e calibrar.	6 anos	Manut.
	Vazamento no cilindro intensificador	S2 - Restauração programada	Avaliar cilindro intensificador, verificar necessidade de substituição dos reparos de vedação.	6 anos	Manut.
	Vazamento por conexões	S2 - Restauração programada	Avaliar linhas e conexões, verificando necessidade de substituição/reaperto.	6 anos	Manut.
	Vazamento na bomba de lubrificação dos êmbolos	S2 - Restauração programada	Restaurar a bomba de lubrificação dos êmbolos.	6 anos	Manut.
	Vazamento na válvula direcional manual	S2 - Restauração programada	Restaurar válvula direcional manual.	6 anos	Manut.
	Vazamento na bomba auxiliar	S2 - Restauração programada	Restaurar bomba auxiliar.	6 anos	Manut.
	Vazamento na bomba principal	S2 - Restauração programada	Restaurar bomba principal.	6 anos	Manut.
	Recirculação interna no cilindro intensificador	N2 - Restauração programada	Avaliar cilindro intensificador, verificar necessidade de substituição dos reparos de vedação.	6 anos	Manut.
	Falha na bomba do óleo de comando	O2 - Restauração programada	Restaurar a bomba de óleo de comando.	6 anos	Manut.
	Falha na bomba principal	O2 - Restauração programada	Restaurar bomba principal.	6 anos	Manut.
	Falha mecânica de motor elétrico	O1 – Sob condição programada	Fazer análise de vibração, verificando necessidade de reparo/substituição.	15 dias	Preditiva
	Falha elétrica (motor, gaveta e conexões)	O - Nenhuma manut. programada	-	-	-
	Travamento/não acionamento na micro de reversão	O1 – Sob condição programada	Inspeccionar micro de reversão	Semanal	Manut.
	Nível baixo no tanque de armazenamento de óleo	O - Nenhuma manut. programada	-	-	-
	Superaquecimento do sistema hidráulico	O2 - Restauração programada	Limpar os trocadores de calor.	6 anos	Manut.
Recirculação interna nas válvulas direcionais	O2 - Restauração programada	Restaurar ou substituir as válvulas direcionais.	6 anos	Manut.	