

METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO COMBINADA DE MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE E NA CONDIÇÃO (RCM+CBM)

Claudia R. C. de Oliveira^{1*}, Paulo J. Abdalla¹, Josenid F. Vasconcellos Jr.¹, Emerson M. Jorge¹, Luiz F. da S. Oliveira²

¹Mestrado Profissional em Gestão de Sistemas de Engenharia do Centro de Engenharia e Computação, Universidade Católica de Petrópolis, Petrópolis, 25.685-070, RJ, Brasil

²Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Católica de Petrópolis, Petrópolis, 25.685-070, RJ, Brasil

Palavras-chave: Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM); Manutenção Baseada na Condição (CBM); Disponibilidade de Equipamentos; Monitoramento.

Resumo. Frente aos desafios globalizados atuais, a produtividade é elemento de busca constante em todas as empresas que procuram se manter competitivas e se preparar para o futuro. Esta produtividade precisa ser claramente confirmada por meio de resultados operacionais, e um componente importante, que passou a ser observado com muito mais atenção pelas empresas, é a manutenção mais efetiva (e mais inteligente) dos equipamentos utilizados em seu processo produtivo. A obtenção de maior confiabilidade e a otimização dos custos de manutenção, inicialmente vistos antagonicamente, têm sido parceiros e são obtidos através de um processo disciplinado de mudança onde o foco está, resumidamente, em mudar o objetivo da Manutenção, de “preservar o equipamento” para “preservar a sua função” e em se executar somente o que e quando se fizer necessário para atingir os resultados esperados. A metodologia sugerida para se obter essa efetividade une os conceitos da Manutenção Centrada na Confiabilidade, ou RCM, e da Manutenção Baseada na Condição, ou CBM, empregando os conceitos de Manufatura Enxuta. Essa proposta vem trazendo resultados significativos nas áreas selecionadas como piloto de um parque fabril, de uma empresa de alta tecnologia do ramo aeronáutico, onde a aplicação combinada está sendo implementada através de um estudo de caso. Os resultados, obtidos no primeiro ano de implantação, já trazem o nível de disponibilidade dos equipamentos, relativo à sua manutenção, para os patamares requeridos de 95 % a 98 % e a redução dos custos associados a valores que variam de 5 % a 10 %. O presente trabalho objetiva apresentar a metodologia e os resultados de sua aplicação, no intuito de ser suporte para empresas que buscam otimizar o processo de gestão dos seus ativos, saindo de uma plataforma de Manutenção Tradicional.

*Endereço de e-mail: claudia.41840053@ucp.br.

COMBINED APPLICATION OF RELIABILITY AND CONDITION BASED MAINTENANCE (RCM + CBM)

Keywords: Reliability Centered Maintenance; RCM; Condition Based Maintenance; CBM; Equipment Availability; Monitoring.

Abstract. In the face of today's globalized challenges, productivity is a key element to all companies looking for keeping competitiveness and being well prepared for the future. This productivity needs to be clearly confirmed through operating results. One of the productivity evaluation components, increasingly gaining business attention, is the more effective (and smarter) maintenance of the equipment used in their production process. Achieving greater reliability and optimizing maintenance costs, initially viewed antagonistically, reliability and cost savings have been partners and are achieved through a disciplined process of change where the focus is briefly on changing the goal of maintenance strategy from to “preserve equipment” to “preserve its function” and in carrying out only what and when it is necessary to achieve the expected results. The suggested methodology for achieving this sought-after effectiveness combines the concepts of Reliability Centered Maintenance (RCM) and Condition Based Maintenance (CBM) employing Lean Manufacturing concepts. This proposal has been bringing significant results in the areas selected as pilot of a high technology factory park where the combined application is being implemented through a Case Study. The results, obtained in the first year of implementation, already bring the level of availability associated with the maintenance of equipment to the required levels of 95 % to 98 % and the reduction of associated costs already reach values ranging from 5 % to 10 %. This work aims to present the methodology itself and the results of its application. The methodology can support companies that seek to achieve the effectiveness measured in the process of maintaining their assets, leaving a platform of Traditional Maintenance.

1 INTRODUÇÃO

A Manutenção Centrada a Confiabilidade (RCM – *Reliability Centered Maintenance*) teve seu início em 1968, pela necessidade de certificação da linha de aeronaves Boeing 747, pela agência norte-americana de aviação FAA (*Federal Aviation Administration*). O uso das metodologias tradicionais de manutenção, em equipamentos desta complexidade, simplesmente iria inviabilizar o atendimento às exigências das autoridades aeronáuticas americanas. Desde a sua implantação, reforçou-se a valorização do conceito de função do equipamento sob manutenção e da sua entrega à operação.

O conceito de Manutenção Baseada na Condição (CBM – *Condition Based Maintenance*) foi estabelecido no início desse século com o objetivo de promover a execução da manutenção dos equipamentos (e sistemas) no momento mais adequado, porém, antes que o equipamento e/ou sistema perdesse a sua performance ótima. A CBM recomenda que decisões de manutenção sejam tomadas através de dados obtidos por monitoramento das condições do equipamento e considera três etapas básicas [3]:

- coleta de dados;
- análise dos dados obtidos; e
- processo de tomada de decisão estabelecido pelo time da manutenção.

O presente trabalho trata de uma estratégia de manutenção de ativos que combina RCM e CBM, sob uma plataforma de Manufatura Enxuta, sendo esta última uma filosofia japonesa para eliminar desperdícios e aumentar a competitividade de indústrias. O objetivo é apresentar uma solução que permita a empresas, ao implementá-la, aumentar seus níveis de confiabilidade e disponibilidade e, ao mesmo tempo, otimizar os custos associados. Para isso, detalhes da metodologia de implementação dessa estratégia serão apresentados, que inclui o uso de um piloto mínimo viável [11] para demonstração de resultados.

A estratégia de manutenção combinada alerta para que o foco da equipe de manutenção não esteja no equipamento em si, mas nas funções que ele entrega (seu papel no processo produtivo) e, também, demanda que se execute somente o que se faça necessário, no momento adequado, para atingir a confiabilidade e a disponibilidade esperada, otimizando custos. Isso se dá com o auxílio de um processo efetivo de monitoramento e diagnóstico que privilegia os equipamentos que são críticos para a produção. Assim, uma classificação é recomendada para que equipamentos com diferentes relevâncias para a operação produtiva recebam tratamentos diferenciados, balanceando adequadamente o custo-benefício, e possibilitando uma melhor utilização dos seus recursos, sejam eles humanos ou materiais.

Trata-se de uma mudança de cultura no tratamento de equipamentos do chão de fábrica. Seu desenvolvimento é uma resposta às demandas atuais, onde cada vez mais se requer uma maior disponibilidade dos equipamentos, principalmente os mais demandados ou críticos, assim como um atendimento preciso à manutenção das suas funções, quando alguma intervenção é realizada.

Existem alguns trabalhos na literatura que tratam, direta ou indiretamente, da aplicação combinada das estratégias RCM e CBM [8, 10, 13]. Em [10], a questão da confiabilidade é tratada em sistemas de transmissão de energia elétrica, com foco em RCM e redução de custos. No trabalho de Niu et. al [8], os autores apresentam um novo sistema de manutenção baseado em condições aplicado numa plataforma de confiabilidade, para otimizar o custo de manutenção, empregando estratégia de fusão de dados (*data fusion*) para melhorar o monitoramento de condições, avaliação de saúde e prognóstico. Soares [13] apresenta um modelo para aplicação de CBM em trocadores de calor de um sistema de compressão de ar, sob um embasamento de RCM. Ele explora quantitativa e qualitativamente uma aplicação prática de CBM. Em comum, essas publicações falam dos conceitos e propõem aplicações em casos

específicos, apresentando resultados que demonstram que a aplicação combinada dessas metodologias é efetiva, dentro dos objetivos propostos.

Diferentemente da literatura existente, o presente estudo apresenta um guia mais geral de implementação da metodologia combinada, para que empresas cujo parque fabril esteja num ambiente de Manutenção Tradicional (preventivas programadas e corretivas na presença de falhas funcionais) possam atingir uma maior efetividade nos seus processos de manutenção dos seus ativos, com a utilização dos conceitos de Manufatura Enxuta.

Para validação da metodologia proposta, é apresentado um estudo de caso onde foram selecionadas duas áreas piloto do parque fabril, designadas Piloto 1 e Piloto 2, utilizando o conceito de *Lean Start UP*, metodologia de implementação que identifica um piloto mínimo viável [11] para que, com esse, se possa testar por completo o que se objetiva, porém numa escala menor, o que facilita necessários ajustes. Pretende-se mostrar, com este estudo de caso, que é possível: ganhar mais confiabilidade, seja em redução de falhas ou atendimento às funções requeridas, no processo de manutenção de equipamentos; aumentar a disponibilidade de equipamentos utilizando conceitos de Manufatura Enxuta; e reduzir os custos com manutenção sem perder confiabilidade.

O próximo capítulo apresenta uma conceituação mais aprofundada das duas metodologias de manutenção. Em seguida, apresenta-se, em detalhes, os passos para implementação da metodologia combinada. O estudo de caso é, então, descrito e seus resultados apresentados. Por fim, apresentam-se as conclusões acerca dessa implementação.

2 CONCEITUAÇÃO

2.1 Manutenção Centrada na Confiabilidade – RCM

A metodologia RCM é um processo usado para determinar o que deve ser feito para assegurar que qualquer ativo físico ou equipamento, continue a fazer o que seus usuários querem que ele faça, no contexto operacional onde está inserido.

Esse modelo ou estratégia de manutenção se baseia em utilizar os diversos recursos conhecidos na área de manutenção para permitir, na melhor relação custo x benefício possível, o máximo nível de confiabilidade e segurança que se possa obter de um equipamento, planta ou sistema produtivo. Seu objetivo principal é otimizar as estratégias de planejamento de manutenção de forma a aumentar a confiabilidade do sistema produtivo e minimizar custos de manutenção por meio da eliminação de atividades que pouco ou nada influenciem nessa confiabilidade. Implementar práticas de manutenção que estejam centradas em confiabilidade, dentro de um contexto de custo otimizado, é fundamental [1].

Para ser desenvolvida, a metodologia utiliza sete perguntas sobre cada item em revisão ou sob análise crítica, para que seja preservada a função do sistema produtivo [6]:

- 1) Quais as funções e padrões de desempenho do ativo (equipamentos) no seu contexto atual de operação?
- 2) De que forma ele falha em termos de cumprimento de sua função?
- 3) O que causa cada falha funcional?
- 4) O que acontece quando ocorre cada falha?
- 5) De que modo cada falha importa?
- 6) O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha?
- 7) O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa proativa apropriada?

2.2 Manutenção Baseada na Condição - CBM

A Manutenção Baseada na Condição ou Manutenção Baseada em Monitoramento de

Condições, também conhecida como Manutenção Preditiva (*Condition-Based Maintenance* – CBM) é amplamente aplicada no ramo aeronáutico, mas, também, totalmente aplicável em outros campos da indústria. Diferentemente da Manutenção Preventiva Periódica, que executa serviços no ativo ou equipamento mesmo que não existam defeitos aparentes, a gestão de manutenção preventiva baseada em condição somente utiliza intervenções em equipamentos após a constatação de um defeito real - ou risco eminente - ainda que não causando falha presente e, também, a partir da avaliação da evolução de sua deterioração. Esse tipo de manutenção consiste na inspeção e medição (monitoramento) de parâmetros de funcionamento de máquinas e sistemas por meio de aparelhos específicos, especialmente adquiridos ou desenvolvidos para essa finalidade. Visto que todos os ativos se deterioram com o uso, por meio desses aparelhos, é possível acompanhar a evolução de um defeito ao longo do tempo, avaliar sua tendência de degradação e escolher o melhor momento para aplicação de ações de correção antes da falha [2]. Esse fenômeno é exemplificado pela curva P-F [6] mostrada na Figura 1.

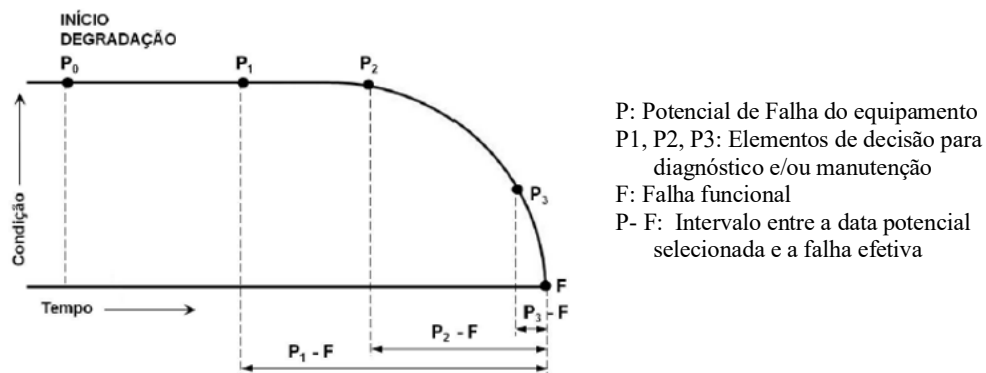


Figura 1: Curva P-F [6]

Conforme a criticidade do equipamento, ou seja, nível de impacto da parada do mesmo sobre a operação, define-se o tamanho do intervalo P-F, sendo maior para equipamentos críticos, com P se aproximando mais de P0 e menor para equipamentos menos críticos, com P se aproximando de P1. O custo da intervenção e o próprio tempo de duração da intervenção também são parâmetros auxiliares usados para decisão sobre o intervalo P-F adequado. Normalmente, são realizadas inspeções e testes preditivos, tais como, medições e análise de vibrações, análises de óleos lubrificantes e isolantes, termografia, medições de isolamento em equipamentos elétricos, análise de ultrassom, entre outros. Os dados coletados são registrados e comparados com históricos existentes, dados de referência fornecidos por normas, desenhos e manuais de fabricantes etc., de modo a checar a existência de defeito e/ou sua respectiva tendência de evolução. Caso seja encontrado algum defeito com taxa elevada de degradação, o reparo é efetuado antes que ocorra a falha. Caso os parâmetros verificados estejam em condições normais, ou com uma taxa baixa ou estável de degradação, a checagem do nível de deterioração é feita numa próxima inspeção [2, 7]. Na medida em que as tendências de deterioração são avaliadas, as frequências de inspeções podem aumentar ou, até, diminuir.

A curva P-F também pode ser utilizada para representar a relação entre as estratégias de manutenção e os custos relacionados, como pode ser visto, para um caso específico, na Figura 2 [16]. Quanto mais tarde se intervir, mais custosa será a intervenção. Entretanto, nem sempre é fácil precisar a função de degradação de um equipamento ou todos os seus sistemas o que requer análises mais profundas e/ou utilização de elementos adicionais de monitoramento.

A implantação da CBM parte geralmente da constatação de que a estratégia de manutenção

preventiva periódica não consegue atingir os patamares de eficiência, custos, disponibilidade e confiabilidade necessários.

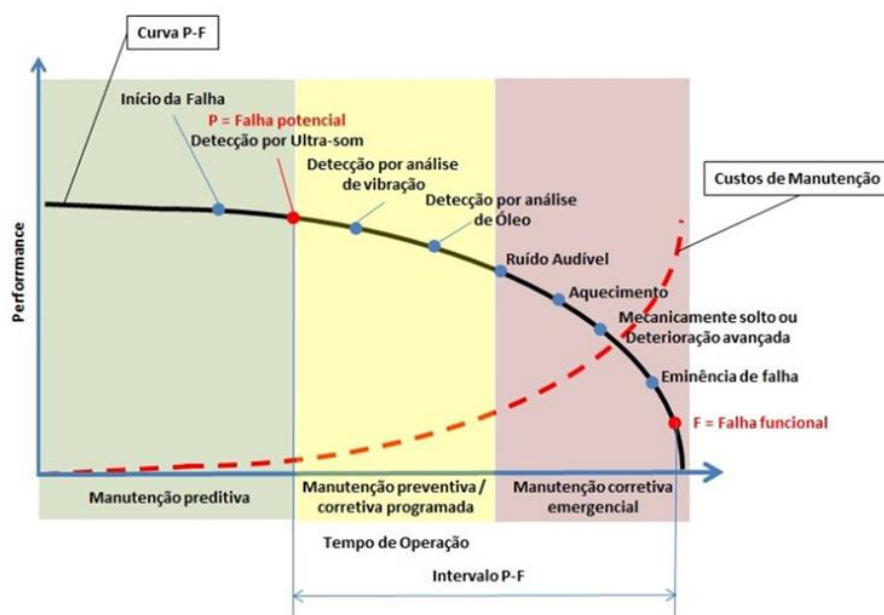


Figura 2: Curva P-F - Estratégia de Manutenção x Custos [16]

A Manutenção Baseada na Condição implica em uma evolução significativa em relação à Manutenção Corretiva e Preventiva periódica, também denominada Manutenção Tradicional. Entretanto, em muitas situações, as condições básicas para sua implementação não estão disponíveis, ao menos no início, a saber: os dados necessários para análise não estão disponíveis; o pessoal envolvido ainda não possui a suficiente familiarização com os conceitos e técnicas e nem é claro o contexto dos processos que envolvem os ativos ou equipamentos. Além disso, em virtude de seu custo inicial e da necessidade de supervisão e monitoramento, é recomendável iniciar a implantação da Manutenção Baseada na Condição pelos ativos mais importantes da instalação, estratégia alinhada com os conceitos de Manufatura Enxuta.

A condução regular da CBM apresenta resultados significativamente mais favoráveis se comparados à Manutenção Tradicional [2, Chimack et al. apud 5, 14]:

- 8 % a 12 % de redução de custos;
- 35 % a 45 % de redução nos tempos de parada para manutenção em geral;
- eliminação de 70 % a 75 % das paradas não programadas; e
- 20 % a 25 % de incremento na capacidade de produção.

É importante se avaliar com cuidado a estratégia de implementação para se obter os resultados esperados no período definido. A Tabela 1 apresenta os aspectos positivos e negativos no emprego da CBM. Salienta-se que é necessário que os aspectos positivos sejam reforçados e os negativos mitigados para o sucesso da implantação da CBM, ainda que em conjunto com a RCM.

Tabela 1 – Aspectos Positivos e demandas associadas a aplicação de CBM. Adaptado de [2, Chimack et al. apud 5, 14]

Aspectos Positivos	Aspectos Negativos ou Demandas
<ul style="list-style-type: none"> • Permite total integração com o planejamento de recursos; • Torna mais efetivas as ações preventivas, devido ao monitoramento de possíveis falhas; • Permite que somente os reparos necessários sejam feitos e, com isso, melhora a relação custo x benefício das intervenções; • Reduz a duração e frequência das interrupções (MTBF*/MTTR**); • Aumenta a vida útil e a disponibilidade do ativo; • Permite maior flexibilidade na programação de serviços, otimizando recursos; • Reduz perdas de energia e insumos, promovendo ganhos de produtividade; • Contribui para o aumento da confiabilidade; • Permite aumento da produção devido a maior disponibilização de recursos críticos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exige alto conhecimento dos equipamentos e seu funcionamento: <ul style="list-style-type: none"> • Risco de falha na definição dos tipos de inspeção e frequência; • Risco na definição dos alertas e máximos permitidos antes da falha; • Requer forte treinamento técnico dos inspetores e mantenedores; • Requer disponibilização do equipamento para diagnóstico em tempo adequado para evitar a falha; • Requer planejamento e controles efetivos da execução das intervenções; • Requer planejamento e controle efetivo de materiais, totalmente alinhados com o planejamento das intervenções;

(*) Mean time between failures; (**) Mean time to Repair

2.3 Contribuição da Manufatura Enxuta

O conceito de melhoria e aprimoramento contínuo e de eliminação de desperdícios começou fortemente há 70 anos atrás com o Sistema Toyota de produção (TPS, *Toyota Production System*) e veio se perpetuando e aprimorando ao longo do tempo, não só na Toyota mas em todas as empresas ao redor do mundo com o *Lean Manufacturing*, ou Manufatura Enxuta. Esta evidencia e reforça o conceito do que realmente agrega valor e em que se deve empenhar esforços para se obter os resultados desejados na busca de uma efetividade (eficiência + eficácia) cada vez maior nos processos produtivos e em quaisquer outros ambientes onde haja um processo, até hospitalares [15].

São cinco os princípios da Manufatura Enxuta:

- 1) Valor: Como passo número 1 é necessário definir o que é valor para o cliente (seja esse Externo ou Interno);
- 2) Fluxo de Valor: É preciso alinhar, na melhor sequência possível, as atividades que entregam valor para os clientes (eliminando, ao máximo, aquelas que não o fazem);
- 3) Fluxo Contínuo: O processo deve fluir sem interrupções e sem estoques intermediários;
- 4) Puxar o processo ou o Fluxo (em vez de empurrar, como nos processos organizados convencionalmente): Produzir somente o necessário, no momento certo e entregar somente quando alguém puxar (JIT, *Kanban*, métodos consagrados trazidos do TPS); e
- 5) Melhoria Contínua (Kaizen): “Hoje melhor que ontem e amanhã melhor que hoje!”.

Os eventos 5S (SEISO, SEITON, SEIRI, SEIKETSU, SHITSUKE) – Limpeza, Arrumação, Organização, Padronização e Disciplina – são empregados quando se implementa um novo processo ou metodologia para servir de preparação para sua implementação, ajudando a eliminar desperdícios através de limpeza, arrumação e organização da área a ser utilizada (assim como redução àquela necessária); Padronização de processos e locais para materiais e, deixando como legado, uma forma de controle disciplinada para que o esforço empenhado pela equipe no 5S não se perca. Os conceitos e princípios de Manufatura Enxuta, a serem trabalhados com as equipes responsáveis pela implementação de uma nova metodologia, através de eventos Lean, são necessários não somente na implantação em si, mas, também, no próprio desenho dessa metodologia, de forma que desperdícios diversos sejam eliminados e boas práticas sejam perpetuadas. Na estratégia de manutenção proposta, os princípios de Lean serão necessários para modificar claros desperdícios presentes, tais como a execução de tarefas ou a substituição de componentes não necessários na data de uma intervenção preventiva programada. Um outro exemplo seria a perda de tempo produtivo, com um equipamento parado aguardando intervenção, na procura de materiais que se encontram mal organizados ou não estão disponíveis.

3 APLICAÇÃO COMBINADA DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO BASEADA NA CONDIÇÃO (MCC²)

A combinação das estratégias de manutenção RCM e CBM, denominada aqui de metodologia MCC², procura buscar o que de melhor e mais genericamente aplicável pode ser obtido de cada metodologia e conceitos associados, suportada pelos conceitos de Manufatura Enxuta. A Manutenção Centrada na Confiabilidade fortalece o foco no equipamento, ou seja, impede que o setor de manutenção retorne um equipamento à operação que não satisfaça àquilo que o setor de produção espera dele. A Manutenção Baseada na Condição habilita a avaliação dos equipamentos, enquanto em operação, de forma a definir o momento e o modo corretos de intervenção, aumentando seu tempo de utilização e o intervalo entre os reparos (MTBF) e, ao mesmo tempo, a eficácia da sua manutenção, reduzindo custos.

A MMC² está fundamentada em:

- uma forte ênfase em registros normatizados e obtidos de forma metódica para que sejam fonte de informação, e não somente dados;
- foco na entrega da função dos equipamentos e não somente no seu retorno à operação [12];
- planos de inspeção devidamente desenhados pela equipe de Engenharia de Manutenção, aproveitando o conhecimento da equipe de combate de chão de fábrica (preventiva ou corretiva) e a classificação das diferentes relevâncias feita para os equipamentos do parque;
- conceito preditivo para programação das intervenções de manutenção baseado nas inspeções e diagnósticos; e
- participação ativa dos operadores dos equipamentos e sua liderança, os quais são parte fundamental do processo e do sucesso da implementação.

3.1 Etapas para a implantação orientadas pelos conceitos de Manufatura Enxuta e PMBOK guide [9]:

A implantação da metodologia MCC² compreende os seguintes passos:

- 1) Fase preliminar (Preparação e Iniciação):
 - a) treinamento na metodologia;
 - b) avaliação da forma e abrangência de aplicação; e

- c) validação da necessidade da implementação com a alta gerência (preparação anterior elaborada com o devido conhecimento das oportunidades e resultados; registros das definições advindas do processo de validação).
 - 2) Escolha do líder do projeto;
 - 3) Treinamento das equipes envolvidas (Manutenção e Operação): time do chão de fábrica e seus líderes, Engenharia etc.;
 - 4) Envolvimento dos times através de eventos que precisam ser facilitados por consultor e/ou elemento interno que domine as metodologias envolvidas e entenda a proposta da implantação combinada;
 - 5) Avaliação e promoção de mudanças no ambiente para uma adequada implantação:
 - a) eventos de 5S (Limpeza, Arrumação, Organização, Padronização e Disciplina => SEISO, SEITON, SEIRI, SEIKETSU, SHITSUKE – Kaoro Ishikawa) nas áreas de manutenção e suprimento de material (*spare parts* e consumíveis);
 - b) criação ou modificação de funções e papéis, inclusive junto a RH, que estejam alinhados à nova demanda da metodologia (cargos de inspetores, e planejadores de manutenção; divisão das equipes entre as funções de inspeção, intervenções preditivas, corretivas programadas, pronto atendimento, etc.); criação de novos ou adequação de turnos e/ou horários de trabalho para melhor atender à demanda de inspeções ou intervenções; e
 - c) distribuição do pessoal pelos diferentes turnos para atender à essa demanda e melhor conciliá-la com os horários dos times da operação.
 - 6) Escolha de uma ferramenta de TI que suporte os registros das informações requeridas, análise de dados, programação e controle das ordens de serviço;
 - 7) Definição do modo de implementação (parcial ou total; em etapas; outras);
 - 8) Seleção de um ou dois pilotos (máximo) que permitam validar a metodologia combinada em sua extensão e comprovar os resultados propostos (mantida a devida escala):
 - a) o critério de seleção pode estar alinhado com um dos princípios do *Lean StartUp*, o que permite 100 % da aplicação da metodologia no menor tempo e custo. É preciso se obter resultados representativos e registrar as lições aprendidas para ajuste no plano de implementação para todo o parque fabril;
 - b) outro critério de seleção pode ser a adoção como piloto de uma ou, no máximo, duas áreas do processo produtivo que tenham alta demanda em termos de confiabilidade e disponibilidade; e
 - c) o piloto precisa de um time de implementação formado por pessoas de manutenção e operação. Um líder adicional para cada piloto selecionado (se mais de um) pode ser adequado.
 - 9) Revisão pelo time de Engenharia de todos os planos de manutenção. Consultores externos, conhecedores dos equipamentos e da metodologia, podem auxiliar nessa etapa;
 - 10) Aquisição de instrumentos, ferramental e/ou equipamentos necessários para inspeção e monitoramento, a partir dos planos revisados pela Engenharia de Manutenção;
 - 11) Definição dos indicadores aplicáveis para acompanhamento dos resultados e suporte a fase de controle; e
 - 12) Promoção de reuniões de revisão recorrentes, onde se verifique o cumprimento das ordens estabelecidas pelo plano de manutenção e ações associadas. Sugere-se fazer revisões por área, em vez de agrupar muitas áreas, objetivando agilidade e participação.
- A MCC² requer que o equipamento seja dividido em seus subsistemas e esses priorizados e avaliados profundamente para que dados de funcionamento e monitoramento, assim como as intervenções de manutenção, sejam mais efetivos. Assim, é possível: (a) propiciar análise mais

profunda de possíveis falhas; (b) priorizar as inspeções e intervenções de acordo com a influência e contribuição de cada sistema ou subsistema na entrega da função (ou funções).

Outro ponto considerado crítico para metodologia MCC² é a implementação de um processo de revisão das falhas, paradas e intervenções – que ainda acontecerem de forma inesperada – entre os times da engenharia (Manutenção e Operação), inspeção, mantenedores e operadores. Essa revisão promove a adequada análise e retroalimentação do plano geral de manutenção, assim como os ajustes necessários nos planos de inspeção e intervenções, o que é fundamental para a sustentabilidade dos resultados.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA – ESTUDO DE CASO

A implantação da metodologia proposta foi aplicada em um parque fabril de uma empresa de alta tecnologia do setor aeronáutico, o qual requer uma alta disponibilidade dos seus equipamentos, da ordem de 95 % a 98 %. Esse parque fabril empregava a Manutenção Tradicional em suas máquinas e equipamentos. Embora garantida a qualidade, a estratégia utilizada era limitada quando se procurava patamares superiores de produtividade como maior disponibilidade e custos mais baixos. Em algumas situações, após realizada uma intervenção de manutenção, os equipamentos eram devolvidos à área de operação com alguma deficiência relativa aos parâmetros desejados, não entregando o resultado esperado com relação à função que deveriam desempenhar, causando retrabalhos para o time da manutenção e/ou intervenções mais longas. Dentro dessa perspectiva, observou-se uma oportunidade de melhoria nos índices de manutenção, mudando-se a forma como esta era desempenhada. Para tanto, foram realizadas reuniões e a empresa optou pela implantação do MCC², inicialmente em dois setores, escolhidos como pilotos, dentro do conceito de *Lean Start Up* [11], para avaliar sua eficácia. Esses dois setores foram: Processos Químicos e Fornos a Vácuo, selecionados dentro do conceito de Produto ou Processo Mínimo Viável (*MVP*), porém considerando um nível mínimo de complexidade que a área deveria possuir para garantir a representatividade. Para cada área piloto, foi designado um líder de equipe. Esses líderes de implementação da metodologia MCC² nas áreas piloto coordenaram as revisões dos planos de manutenção e inspeção, para cada equipamento do programa, categorizado adequadamente por sua relevância dentro do processo operacional. Foram criados *check-lists* pelo setor de Engenharia e, de posse desses, foram realizados os procedimentos de inspeção e monitoramento das máquinas e equipamentos. Inspetores e mantenedores foram treinados na nova metodologia e contribuíram para que a efetividade dos planos de monitoramento.

Equipamentos necessários para os monitoramentos, diagnósticos e análises necessárias foram adquiridos. São estes: Instrumentos para Termografia; osciloscópios mais adequados às necessidades; equipamentos para análise de vibração (em motores e eixos, por exemplo); equipamentos para verificação de alinhamentos em sistemas de transmissão; equipamentos para inspeções boroscópicas; espectrômetros de massa. entre outros. Análises contratadas em óleos lubrificantes, por exemplo, também fizeram parte da competência preditiva.

Os inspetores, desde então, influenciam o programa de intervenções de máquinas e equipamentos, a partir dos resultados obtidos, o que otimiza o plano geral de manutenção da fábrica. Da mesma forma, está implantada uma equipe dedicada ao MCC², trabalhando em turnos mais favoráveis o que, também, tem ajudado no aumento da disponibilidade dos equipamentos.

A partir do sucesso dos dois pilotos, a equipe de manutenção passou a trabalhar com o conceito de manutenção preditiva, sem, contudo, descartar as manutenções preventivas, sendo estas aplicadas absolutamente quando necessárias.

Com o novo entendimento acerca da manutenção focada na preservação da função e das

intervenções preditivas, as equipes de manutenção escolhidas para o processo de transição foram estimuladas a identificar as mudanças nos procedimentos, ações e rotinas necessárias, assim como a definição de indicadores (KPI – *key performance indicators*) que mostrassem de forma clara o caminho a ser percorrido ou o estágio em que se encontravam na implantação da nova metodologia MCC².

4.1 Processo de Autoavaliação e preparação da equipe para a Implementação

Foi realizada uma autoavaliação comparativa entre a manutenção que efetivamente ocorria na fábrica e a MCC², e por meio desta autoavaliação, as equipes puderam estabelecer uma visão da situação presente versus os objetivos que se pretendiam atingir com a nova metodologia. A Figura 3 mostra o resultado dessa autoavaliação onde, na escala de 1 a 10, quanto mais próximo do valor 1, mais próximo o time entendeu que estava da Manutenção Tradicional; ao contrário, quanto mais perto das práticas promovidas pela nova metodologia, maior o valor atribuído.

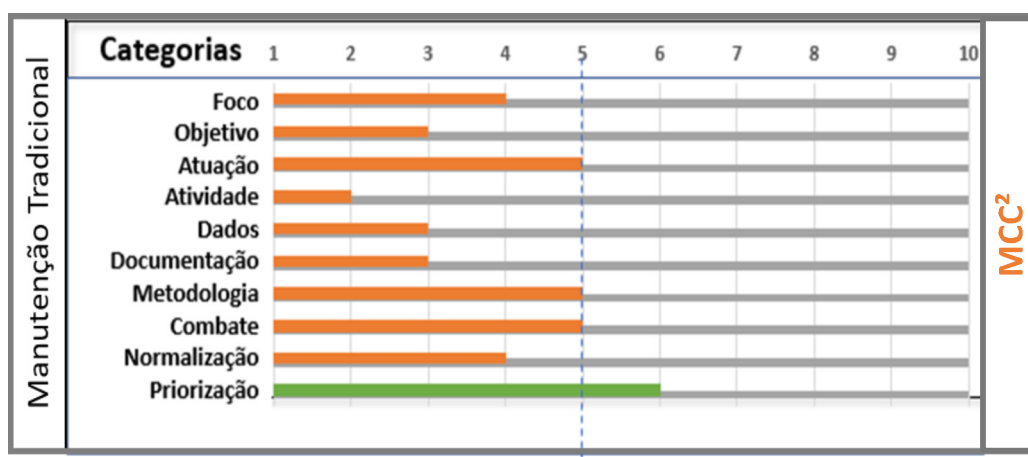


Figura 3 – Manutenção Tradicional x MCC² - Autoavaliação. Adaptado de [9,12]

A Figura 4 foi utilizada como treinamento do time para a autoavaliação, permitindo um adequado entendimento dos elementos que estavam sendo ranqueados. A autoavaliação foi um dos elementos mais importantes do processo de preparação da equipe para a implementação pois ela permitiu que houvesse uma reflexão clara sobre a distância entre o que se deseja atingir e o *status quo*.

A participação ativa das equipes em eventos associados ao processo de transição, os quais usaram os conceitos e princípios da Manufatura Enxuta, foi um elemento importante que ajudou a construir uma visão dos resultados que poderiam ser atingidos e reforçar os objetivos definidos. O foco, anteriormente centrado no equipamento, foi sendo modificado para se estabelecer uma estratégia com enfoque na função ou funções, cujo conhecimento e entendimento de sua importância deixou de ser um privilégio do time da operação e passou a ser um elemento de referência para uma gestão efetiva de manutenção.

Os elementos a serem ranqueados foram extraídos de [4, 12], como apresentado na Figura 4, a qual também apresenta as características de atuação que norteiam as duas metodologias de manutenção. Esse evento de autoavaliação contou com a participação da engenharia e do gerente da manutenção; de gerentes operacionais; mantenedores; pessoal do chão de fábrica; consultores externos e internos, conhecedores da metodologia; além de facilitadores da equipe de Manufatura Enxuta e Programa Seis Sigma.

Manutenção Tradicional vs MCC²

Características / Forma de atuação	Manutenção Tradicional	MCC ²
Foco	No Equipamento	Na Função
Objetivo	Manter o Equipamento	Preservar a função
Atuação	No (s) Componente (s)	No(s) Sistema(s)
Atividade	O que pode ser feito	O que deve ser feito
Dados	Pouca ênfase	Muito ênfase
Documentação	Reduzida	Obrigatória e Sistemática
Metodologia	Empírica	Estruturada
Combate	Deterioração do Equipamento	Consequências das falhas
Normalização	Não	Sim

Figura 4 – Painel utilizado nos treinamentos. Adaptado de [4, 12]

4.2 Métricas e Resultados

Para que se pudesse verificar os resultados trazidos pelo programa, os seguintes indicadores foram acompanhados e comparados com períodos anteriores:

- disponibilidade (parcela associada à Manutenção);
- MTBF – É a média de tempo que uma falha ocorreu até a próxima falha ocorrer novamente;
- MTTR - É a média de tempo que se leva para executar um reparo após a ocorrência da falha;
- quantidade de corretivas antes e depois do MCC – Utilizado para comparar a eficiência dos Planos de Manutenção; e
- custos associados a Manutenção.

A Tabela 2 apresenta alguns dos resultados (média) obtidos no período de implementação da metodologia nas áreas piloto. Percebe-se que os resultados indicam uma melhora significativa dos parâmetros analisados. Mesmo que, em muitas situações, seja necessário avaliar tendências e outros indicadores estatísticos que efetivamente indiquem a realidade dos sistemas, pode-se concluir que os resultados apresentados são suficientes para validar a metodologia proposta e motivar a empresa a aplicá-la em mais áreas.

Tabela 2: Resultados relativos à implementação de MCC². Valores percentuais.

	Disponibilidade	Intervalo entre intervenções (aumento) MTBF	Tempo médio de Reparo (redução) MTTR	Quantidade de corretivas não programadas (redução)	Redução de Custos
Piloto 1	5,3	20,2	28,0	43,0	7,3
Piloto 2	10,1	16,4	12,4	26,2	4,1

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma proposta de implantação de uma estratégia de manutenção de ativos que traz uma melhora na disponibilidade dos equipamentos e uma redução de custos de manutenção, utilizando os conceitos de Manufatura Enxuta, Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) e Manutenção Baseada na Condição (CBM).

As empresas que já introduziram a estratégia RCM e mesmo aquelas avaliando um processo de ajuste para a estratégia CBM, também podem enriquecer o seu programa através desta proposta combinada, aqui identificada como MCC², a qual se utiliza de uma estratégia complementar entre esses conceitos e oferece uma metodologia de implementação que pode ser utilizada amplamente, fazendo com que o programa de mudança se torne mais eficaz e produza os resultados de confiabilidade e redução de custos esperados.

Dependendo do ramo da indústria, a implantação da metodologia CBM e, mesmo a RCM pode ser vista como demandante de recursos humanos e capital relativamente altos, desestimulando sua aplicação. Entretanto, o presente trabalho mostra que ações simples, orientadas por conceitos da Manufatura Enxuta, podem ser tomadas promovendo resultados imediatos e significantes. A redução de custo e disponibilidade dos equipamentos obtida (principalmente Recurso Crítico), compensa em muito os investimentos necessários. O incentivo à participação efetiva dos times envolvidos na implementação e, posteriormente, na execução traz uma motivação adicional e é elemento fundamental para o seu sucesso.

Na empresa do ramo aeronáutico onde o estudo de caso foi implementado e onde as mais modernas técnicas e conceitos são aplicados no seu processo produtivo, paradoxalmente, ainda era empregada uma estratégia de manutenção tradicional para as máquinas e equipamentos do seu parque fabril, o que demandava custos maiores para se atingir os resultados esperados e limitava a determinados patamares de disponibilidade e otimização de custos. A mudança para a estratégia de manutenção proposta tem trazido resultados animadores, demonstrados com os pilotos. Esses resultados atenderam aos objetivos planejados, o que incentivou a decisão da aplicação da metodologia em todo o parque fabril da empresa, processo esse em andamento. Uma possível evolução dessa metodologia considera a aplicação de um processo de análise de falhas e seus efeitos, como a Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos no Processo (PFMEA).

Agradecimentos

Nossos agradecimentos às relevantes contribuições para revisão do estudo de caso e implementação da metodologia proposta aos professores do Mestrado Profissional em Gestão de Sistemas de Engenharia, UCP, José Cristiano Pereira, Nélio Domingues Pizzolato, Giancarlo B. Micheli e Renato Portugal. À empresa onde foi implementado o Estudo de Caso e sua equipe de Manutenção e de Operação, especialmente da área de Engenharia de Reparos de Componentes, Lean Six Sigma, Processos Químicos e Tratamentos Térmicos a Vácuo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Gulati. *Maintenance and Reliability Best Practices*. Industrial Press, Inc., 2nd edition, 2012.
- [2] International Atomic Energy Agency – IAEA. *Implementation Strategies and Tools for Condition Based Maintenance at Nuclear Power Plants*. IAEA TECDOC 1551, 2007
- [3] A. Kardec e J. Nascif. *Manutenção: Função Estratégica*. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 3^a edição, 2001.
- [4] J. Knight. *Reliability Centered Maintenance vs Condition Based Maintenance article*. Disponível em <<https://eecoonline.com/reliability-centered-maintenance-vs-condition-based-maintenance/>>. Acessado em junho de 2020.
- [5] M. Maran, *Manutenção Baseada em Condição aplicada a um Sistema de Ar Condicionado como requisito para sustentabilidade de Edifícios de Escritórios*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – SP, Brasil, 2011.

- [6] J. Moubray. *Reliability-Centered Maintenance*. Industrial Press Inc, 5th edition, 2007.
- [7] National Aeronautics and Space Administration - NASA. *RCM Guide - Reliability Centered Maintenance guide for facilities and collateral equipment*. USA Government, 2008.
- [8] G. Niu, B. S. Yank, e M. Pecht, Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(7):786–796, 2010.
- [9] Project Management Institute. *Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK)*. PMI, 6^a edição, 2017.
- [10] D. J. Ren. Reliability Centered Maintenance for Condition Based Maintenance application on transformation equipment. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Information Science (EEEIS2015)*, 100–105, 2016.
- [11] E. Ries. *The Start Up Way: How Modern Companies Use Entrepreneurial Management to Transform Culture and Drive Long-Term Growth*. Currency, 2017.
- [12] I. P. de Siqueira. *Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação*. QualityMark, 2005.
- [13] F. G. K. Soares. *Modelo de Manutenção Baseada na Condição para os Trocadores de Calor de um Sistema de Compressão de Ar*. Dissertação de Mestrado, Universidade Católica de Petrópolis, Petrópolis – RJ, Brasil, 2019.
- [14] G. P. Sullivan, R. Pugh, A. P. Melendez e W. D. Hunt. *Operations & Maintenance Best Practices. A Guide to Achieving Operational Efficiency*. U.S. Department of Energy – Federal Energy Management Program, release 3.0, 2010.
- [15] Toyota Motor Company do Brasil. *Toyota Production System – TPS*. Disponível em <<https://youtu.be/61XeVq-1xbY>>. Acessado em junho de 2020.
- [16] R. Vilar. *Curva P-F: Entenda como funciona e previna falhas funcionais dos ativos através das técnicas de Manutenção Preditiva*. Linked in, 2018. Disponível em <<https://www.linkedin.com/pulse/curva-p-f-entenda-como-funciona-e-previna-falhas-funcionais-vilar>>. Acessado em junho de 2020.