

UNIVERSIDADE TECNOLOGIA FEDERAL DO PARANÁ

KAZUYOCHI OTA JUNIOR

**MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE COM ÊNFASE
EM COLHEDORAS DE CANA-DE-AÇÚCAR: BASEADO EM MAPAS
COGNITIVOS FUZZY**

CORNÉLIO PROCÓPIO

2023

KAZUYOCHI OTA JUNIOR

**MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE COM ÊNFASE
EM COLHEDORAS DE CANA-DE-AÇÚCAR: BASEADO EM MAPAS
COGNITIVOS FUZZY**

**Reliability-Centered Maintenance with Emphasis on Sugarcane Harvesters:
Based on Fuzzy Cognitive Maps**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Mendonça

CORNÉLIO PROCÓPIO

2023



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio**



KAZUYOCHI OTA JUNIOR

MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE COM ÊNFASE EM COLHEDORAS DE CANA-DE-AÇÚCAR: BASEADO EM MMAPAS COGNITIVOS FUZZY.

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Ciências Mecânicas.

Data de aprovação: 02 de Setembro de 2023

Dr. Marcio Mendonca, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Rodrigo Henrique Cunha Palacios, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Vicente De Lima Gongora, Doutorado - Faculdade da Industria - Senai

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 11/09/2023.

Dedico esse trabalho a todos os profissionais que mesmo com todas as dificuldades e atividades do dia a dia, se esforçam como pais, maridos, engenheiros e estudantes, visando buscar conhecimento e agregar ao desenvolvimento de nosso país.

Dedico a Fundação Futuro de Assis, a qual estou presidente no ano de 2023.

À Deus e todo Universo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e toda a minha família, minha filha Maria Antonella por todo carinho e motivação com seu amor, minha esposa, Karen Cristina Gimenis Gil Ota pelo amor, carinho e por caminhar sempre ao meu lado e aos meus pais, por terem me proporcionado a oportunidade de ser engenheiro e me guiarem com toda paciência amor e carinho.

Agradeço a todos os professores do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UTFPR – Campus Cornélio Procopio, em especial ao Professor Dr. Márcio Mendonça, por me proporcionar os conhecimentos necessários para obtenção desse título, agradeço a todos meus amigos pelo companheirismo nesse período importante de minha carreira.

Agradeço a Usina São Francisco pelo fornecimento de dados e informações utilizadas nesse trabalho.

RESUMO

OTA JUNIOR, Kazuyochi. **Manutenção centrada na confiabilidade com ênfase em colhedoras de cana-de-açúcar**: baseado em Mapas Cognitivos Fuzzy. 2023. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2023.

A produção de etanol e açúcar nas usinas canavieiras depende diretamente da entrega de cana-de-açúcar pelo setor de CCT – Corte Carregamento e Transporte, que além do setor de cultivo da cultura é também um setor de primordial importância no processo como um todo, formado basicamente por grandes máquinas agrícolas como tratores transbordos, colhedoras de cana e caminhões (rodotrens). Com a chegada da colhedora de cana ao campo, proporcionou-se uma capacidade ainda maior de produção e aumento na capacidade de colheita, com a eliminação da mão de obra no corte manual estimulado pelo fim da queima da cana. Porém, a capacidade de processamento das indústrias também aumentou, assim como a demanda, exigindo cada vez mais disponibilidade mecânica desse equipamento e maior volume de entrega de matéria prima. A colhedora de cana é composta por diversos componentes que podem ser analisados de forma que resulte em um ponto ótimo para intervenções preventivas com auxílio também de análises preditivas e de suas manutenções recorrentes. Nesse contexto, surge a necessidade de preservar, através de ações de manutenção, as condições propícias para o bom funcionamento das máquinas. Nesse sentido, a aplicação de Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM, do inglês *Reliability Centered Maintenance*) com retorno quantitativo por meio de Mapas Cognitivos Fuzzy, especificamente em colhedoras de cana, tem o potencial de aumentar a confiabilidade dos sistemas. Este trabalho explora a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) na perspectiva de uma lista de verificação genérica para a manutenção de colhedoras de cana. Por meio da execução de ações corretivas para falhas e defeitos é possível modelar um Mapa Cognitivo Fuzzy (FCM) crítico e qualitativo que proporcionará um diagnóstico quantitativo aprimorado. Este é apresentado como uma proposta de ferramenta computacional que visa auxiliar na gestão da manutenção, trazendo melhorias tangíveis para os sistemas da empresa de maneira abrangente. Este aspecto ganha ainda mais relevância à luz da ascensão do desenvolvimento tecnológico agrícola. Este trabalho se encerra com uma conclusão e sugestão de futuros trabalhos.

Palavras-chave: Manutenção Centrada na Confiabilidade; Colhedora; Cana-de-açúcar; Mapas Cognitivos Fuzzy.

ABSTRACT

OTA JUNIOR, Kazuyochi. **Reliability-centered maintenance with emphasis on sugarcane harvesters**: based on Fuzzy Cognitive Maps. 2023. 66 f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Federal Technological University of Paraná, Cornélio Procópio, 2023.

The production of ethanol and sugar in sugarcane mills depends directly on the delivery of sugarcane by the CCT sector - Cut Loading and Transport, which, in addition to the culture cultivation sector, is also a sector of prime importance in the process as a whole, formed basically by large agricultural machines such as transshipment tractors, sugarcane harvesters and trucks (road trains). With the arrival of the sugarcane harvester in the field, it provided an even greater production capacity and an increase in harvesting capacity, with the elimination of labor in manual cutting, stimulated by the end of sugarcane burning. However, the processing capacity of industries has also increased, as has demand, requiring more and more mechanical availability of this equipment and greater volume of raw material delivery. The sugarcane harvester is made up of several components that can be analyzed in a way that results in an optimal point for preventive interventions with the help of predictive analyzes and its recurring maintenance. In this context, the need arises to preserve, through maintenance actions, the favorable conditions for the proper functioning of the machines. In this sense, the application of Reality Centered Maintenance (RCM) with quantitative feedback through Fuzzy Cognitive Maps, specifically in sugarcane harvesters, has the potential to increase the reliability of systems. This work explores Reliability Centered Maintenance (RCM) from the perspective of a generic checklist for sugarcane harvester maintenance. Through the execution of corrective actions for failures and defects, it is possible to model a critical and qualitative Fuzzy Cognitive Map (FCM) that will provide an improved quantitative diagnosis. This is presented as a proposal for a computational tool that aims to assist in maintenance management, bringing tangible improvements to the company's systems in a comprehensive way. This aspect gains even more relevance in light of the rise of agricultural technological development. This paper ends with a conclusion and suggestions for future work.

Keywords: Maintenance Focused on Reliability; Harvester; Sugarcane; Fuzzy Cognitive Maps.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pseudocódigo sD-FCM aplicado a MCC	46
Tabela 2 - Pseudocódigo RBMLFCM aplicado a MCC	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Toletes de cana-de-açúcar após corte mecanizado	18
Figura 2 - Cana-de-açúcar em área de colheita mecanizada	20
Figura 3 - Estrutura de oficina automotiva	22
Figura 4 - Resultado da análise de lubrificante através de filtragem por manta	28
Figura 5 - Fluxograma abertura de Ordem de Serviço	32
Figura 6 - Colhedora de cana-de-açúcar e sistemas	34
Figura 7 - Colhedora e furgão oficina, manutenção no campo	37
Figura 8 - Máquina de Estados	38
Figura 9 - Fluxograma do funcionamento da SD-FCM aplicado a MCC	44
Figura 10 - sD-FCM aplicado a MCC	46
Figura 11 - Resultados iniciais sD-FCM - Simulação 1 e 2	48
Figura 12 - Resultados iniciais sD-FCM - Simulação 3 e 4	49
Figura 13 - Colhedora de cana-de-açúcar no campo	50
Figura 14a - Índice do exemplo 1	52
Figura 14b - Índice do exemplo 2	53
Figura 15a - Índice do exemplo 3	54
Figura 15b - Índice do exemplo 4	55
Figura 16 - Grafo da viabilidade de implantação por meio do RBMLFCM	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCT	-	Corte Carregamento e Transporte
CRM	-	Custo de Reparo e Manutenção
DCN	-	<i>Dynamic Cognitive Networks</i>
ERP	-	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FCM	-	<i>Fuzzy Cognitive Maps</i>
MCC	-	Manutenção Centrada em Confiabilidade
MEF	-	Máquina de Estados Finitos
MTBF	-	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTR	-	<i>Mean Time To Repair</i>
PCM	-	Planejamento e Controle da Manutenção
PIB	-	Produto Interno Bruto
Rb-FCM	-	<i>Rule Base – Fuzzy Cognitive Map</i>
RCM	-	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
RNA	-	Redes Neurais Artificiais
SAP	-	<i>Systems, Applications e Products</i>
SHM	-	<i>Structural Health Monitoring</i>
SU	-	<i>Simmetrical Uncertainty</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
2.3	Organização do trabalho	17
2.4	Contribuições esperadas	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1	Cultura da cana-de-açúcar e a colheita mecanizada	18
3.2	Tipo de manutenção de equipamentos	21
3.2.1	Manutenção corretiva	25
3.2.2	Manutenção preventiva	26
3.2.3	Manutenção preditiva	27
3.2.4	Manutenção por algoritmo	28
3.3	Manutenção centrada na confiabilidade	30
3.4	Planejamento e Controle de Manutenção – PCM	34
3.5	Mapas cognitivos Fuzzy – Fuzzy Cognitive Maps (FCMs)	38
4	MAPAS COGNITIVOS FUZZY APLICADOS NA QUANTIFICAÇÃO DA MANUTENÇÃO	41
5	FUNDAMENTOS E DEFINIÇÕES DA NECESSIDADE DE MANUTENÇÃO DE ACORDO COM RBMFCM	50
5.1	Lógica multivalorada	51
5.2	Lógica multivalorada aplicados na quantificação da manutenção de colhedoras de cana-de-açúcar	52
6	CONCLUSÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Após a Primeira Revolução Industrial, as indústrias passaram por diversas mudanças significativas, visando a máxima otimização dos processos. Com a mecanização e a automação, os equipamentos tornaram-se mais complexos e caros, exigindo um maior controle e atenção para evitar falhas e paradas inesperadas.

Nesse contexto, o setor de manutenção começou a ser entendido de forma mais técnica, migrando da função de suporte e ações imediatistas e corretivas, para conceitos preventivos de manutenção. Essa evolução foi impulsionada por diversos fatores, como o aumento da competitividade do mercado, a pressão por redução de custos e a busca por maior produtividade (OLIVEIRA, 2013).

Kardec e Nascif (2001) discutem os conceitos preventivos de manutenção visam a antecipar a ocorrência de falhas, por meio de um planejamento e monitoramento sistemático dos equipamentos. Essa abordagem pode ser dividida em três tipos principais:

Manutenção corretiva: Ação realizada após a ocorrência de uma falha. É o tipo de manutenção mais simples e menos eficiente, pois geralmente resulta em paradas de produção e perda de produtividade.

Manutenção preventiva: Ação realizada em intervalos pré-determinados, com base na análise de históricos de falhas e desgaste. É uma abordagem mais eficiente que a manutenção corretiva, pois evita paradas de produção inesperadas.

Manutenção preditiva: Ação realizada com base na identificação de padrões de comportamento dos equipamentos. É a abordagem mais eficiente de manutenção, pois permite identificar e corrigir falhas antes que elas ocorram.

Atualmente, com o avanço da tecnologia, existem diversos métodos preditivos inseridos nesse amplo campo preventivo de manutenção. Esses métodos utilizam uma variedade de ferramentas e técnicas diferentes de análise e monitoramento, como:

Análise de vibração: A análise de vibrações é uma das técnicas mais utilizadas para a manutenção preditiva. Ela permite identificar alterações no funcionamento dos equipamentos, que podem indicar a presença de falhas ou desgastes.

Termografia: A termografia é uma técnica que utiliza câmeras infravermelhas para medir a temperatura dos equipamentos. As diferenças de temperatura podem indicar a presença de falhas, pois geralmente são acompanhadas por um aumento no consumo de energia.

Análise de óleo: A análise de óleo é uma técnica que permite avaliar a condição dos lubrificantes dos equipamentos. As alterações na composição do óleo podem indicar a presença de contaminantes, desgastes ou falhas.

A manutenção preditiva é uma ferramenta poderosa que pode ajudar as indústrias a melhorar a produtividade, a disponibilidade dos equipamentos e a reduzir os custos de produção. Ao identificar e corrigir falhas antes que elas ocorram, a manutenção preditiva pode evitar paradas de produção inesperadas, perda de qualidade e danos aos equipamentos.

Essa nova realidade acompanhada de um desenvolvimento tecnológico constante, trouxe diversos estudos e novas técnicas de aprendizagem de máquinas, relacionadas diretamente às condições mecânicas dos equipamentos e seus sistemas componentes, com isso visou-se administrar, monitorar e atuar no momento mais próximo possível do indicado para uma intervenção de manutenção, atuando de maneira preventiva, com métodos preditivos, através de um monitoramento ativo.

A agricultura tem grande importância na economia e desenvolvimento nacional. Com a mecanização agrícola surgiu o aumento das tecnologias presentes no campo, visando eficiência operacional, porém exigindo grande capacidade mecânica e demanda de grandes potências das máquinas.

Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar – ÚNICA (2022), a participação do agronegócio no total do PIB brasileiro ficou em 24,8% no calendário de 2022, sendo um dos setores mais representativos no PIB nacional. A cana-de-açúcar é uma das principais culturas produzidas no Brasil, dela se origina principalmente o açúcar e o álcool, com usinas

esparcidas por todo o país, sendo sua maior concentração no estado de São Paulo.

A agricultura conciliada aos recursos tecnológicos e raciocínios lógicos permite o desenvolvimento assertivo do setor e diversas oportunidades de ganhos nos processos, que cada vez mais estão carentes de mão de obra especializada.

Na década de 60, introduziu-se o conceito de lógica, quando Lotfi Zadeh, professor da Universidade da Califórnia em Berkeley, trabalhava com problemas de classificação de conjuntos que não tinham fronteiras bem definidas. De uma forma geral, a lógica Fuzzy aproxima a precisão característica da matemática à inerente imprecisão do mundo real (ZADEH, 1975).

Segundo Consta (2007), a lógica Fuzzy possibilita a utilização da experiência humana dos especialistas como controladores computadorizados, consiste no tratamento matemático de sistemas onde a subjetividade e as características ambíguas das variáveis processadas, tornam a lógica clássica de difícil modelagem e aplicação. Essa modelagem transforma expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos, convertendo a experiência humana em uma forma compreensível pelos computadores.

O sucesso do setor agrícola/industrial decorre da gestão de suas ações, especialmente se as mesmas forem essencialmente ativas em áreas como a de apoio à competitividade.

A evolução das técnicas e métodos de manutenção necessita priorizar estratégias atuais de operação, as expectativas de preservação ambientais e de segurança por parte da sociedade, as mudanças tecnológicas ambientais crescentes e as mudanças organizacionais (TSANG, 2002).

Com a implantação da colheita mecanizada e conseqüentemente as colhedoras de cana introduzidas também nesse processo, tem-se uma mudança drástica nos processos na lavoura, aumentando sua capacidade de colheita, reduzindo a mão de obra no trabalho braçal e eliminando a necessidade de queima da cana-de-açúcar.

Além da pressão internacional por uma produção sustentável e de exigências governamentais contra a queima da cana, existem também motivações econômicas favoráveis à mecanização da colheita da mesma. Estudos revelam que uma única máquina pode colher até 600 t/dia, substituindo cerca de 100 trabalhadores braçais. (USTULIN; SEVERO, 2001).

A mecanização com confiabilidade em sua manutenção, torna a atividade de produção sucroalcooleira ainda mais sustentável.

A colheita mecânica da cana-de-açúcar apresenta vantagens ambientais e de saúde pública, no que tange à redução da poluição do ar oriunda da queima da palha, ocasionando redução de problemas de saúde advindos da fuligem gerada pela palha queimada. Outra vantagem é que a colhedora, no momento da colheita despeja para o interior do trator com conjunto transbordo, o produto cortado, devolvendo ao canavial a palha da mesma, mantendo o solo coberto, preservando a sua umidade e criando um ambiente propício para a germinação da nova safra (MANHÃES, 2014).

Assim, pode-se concluir que se as colhedoras de cana apresentarem confiabilidade mecânica, maiores serão seus ganhos operacionais e conseqüentemente sua produtividade, reduzindo o consumo de diesel, vazamento de lubrificantes no solo e emissões de poluentes no ar pela combustão incorreta de combustível.

Dentre as tecnologias atuais na área de manutenção, encontra-se a Manutenção Centrada na Confiabilidade - MCC ou do inglês *Reliability Centered Maintenance* – RMC (MENDES; RIBEIRO, 2014). Esta tecnologia originou-se na indústria aeronáutica americana, constituindo-se em procedimentos de identificação de necessidades de manutenção em processos físicos ou industriais. Sua utilização se faz presente em vários outros setores da economia, incluindo o setor de serviços, designada como Manutenção Centrada na Confiabilidade de máquinas e/ou equipamentos.

No contexto supracitado, o trabalho apresenta a metodologia MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade tendo como referência uma análise das manutenções preventivas e corretivas, sugerindo Mapas Cognitivos Fuzzy, do inglês FCM (*Fuzzy Cognitive Maps*), para quantificar a confiabilidade da manutenção e fornecer um *feedback* ao nível de

confiabilidade da manutenção. O FCM sugerido está de acordo com a visão dos especialistas ou experts.

Caiado, Lima e Quelhas (2015) empregaram a MCC com sucesso em uma ferramenta de perfuração utilizada no setor de óleo e gás.

Menge, Selito e Afondo (2013) mencionam esta mesma tecnologia sendo utilizada da modelagem quantitativa aplicada à uma planta petrolífera, definindo a estratégia de manutenção mais adequada para uma bomba centrífuga (preventiva, preditiva, corretiva ou emergencial), com base em cálculos de confiabilidade.

A manutenção centrada na confiabilidade se mostra dinâmica e pode ser utilizada em qualquer segmento, como no caso do estudo de Lucatelli (2002) que empregou a MCC em equipamentos médicos hospitalares. Benini e Santos (2021) utilizaram a manutenção centrada em confiabilidade (MCC) em embaladoras à vácuo de alimentos.

Além disso, a Manutenção Centrada na Confiabilidade já é alvo de estudos por décadas, como Fleming, Silva e França (1999) discutiram sobre a MCC em seis cenários diferentes nas indústrias de siderurgia, *offshore* e petroquímica.

Há estudos que utilizam ferramentas computacionais inteligentes e MCC. Ran *et al.* (2013) implementaram a lógica Fuzzy juntamente com MCC para avaliar o risco de falha para sistemas de supressão de incêndios (*co2AFS – Automated fire system*). A pesquisa de Janier e Zaharia (2011) realizou o monitoramento de condição (CM) no equipamento ao longo de sua manutenção, um tipo de manutenção circunscrita a MCC. No trabalho de Liang e Sun (2011) é usada a ferramenta de Avaliação Sintética Fuzzy para determinar e quantificar o nível de condição de um sistema mecânico no mar, e aplicar técnicas de MCC para avaliar a tipo certo de falha, adotando estratégias para prevenir novos riscos a este sistema. Outro exemplo está presente no estudo de Dehghanian *et al.* (2012), que utiliza AHP (*Analytical Hierarchical Process*) agregado com a teoria de conjuntos Fuzzy e MCC, no intuito de determinar os tipos de componentes mais críticos a serem priorizados em sistemas de distribuição de energia para um planejamento da manutenção.

Al-Najjar e Alsyouf (2003), realizaram um estudo de caso do uso de método Fuzzy MCDM para seleção da abordagem de manutenção mais eficiente, ou seja, mais informativa. Dentre as opções: Manutenção Baseada na Falha, Manutenção Preventiva, Manutenção Baseada na Condição, entre outras. Ding e Kamaruddin (2015) estudaram casos do uso do TOPSIS para seleção de política de manutenção (Manutenção Autônoma, Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva, Manutenção Preditiva) para redução de falhas.

As análises gerenciais da manutenção são realizadas por meio do estudo de banco de dados em sistema ERP, obtidos através de aberturas de Ordens de Serviços - OS em módulo de manutenção automotiva, pelo setor de Planejamento e Controle da Manutenção - PCM.

Nas atividades de manutenção automotiva agrícola as aberturas de Ordens de Serviços são realizadas de acordo com o procedimento específico de cada empresa, porém devem ser realizadas assim que ocorrerem as paradas das máquinas para intervenções de manutenção, seja corretiva ou preventiva.

Quando a OS é aberta, identifica-se e relata-se o que será realizado dentro do sistema ERP. Os termos para a abertura da OS devem ser padronizados de forma que se tenham dados identificados por similaridade em possíveis estudos.

A manutenção de equipamentos e sistemas tem assumido uma função estratégica nas empresas. Fazer uso de ferramentas informatizadas de apoio à manutenção significa economia de recursos, não apenas financeiros, mas também ambientais e humanos (MOUBRAY, 2000).

Através dessas ferramentas a equipe de planejamento da manutenção e engenharia poderá quantificar e otimizar o desempenho das atividades. A confiabilidade da manutenção automotiva da empresa, fornecerá dados para que a equipe operacional possa atuar com precisão e intervir preventivamente nos equipamentos, mais precisamente nas colhedoras de cana.

Os Mapas Cognitivos Fuzzy auxiliarão no processo de gestão da manutenção automotiva de colhedoras de cana utilizando princípios de MCC. Desse modo, realiza-se uma análise durante a aplicação de uma ferramenta

que por meio de conhecimento qualitativo dos profissionais da área de manutenção poderá fornecer um *feedback* quanto a ocorrência de falhas e tempo de retorno desses equipamentos após as manutenções.

Essas ocorrências advertem profissionais da engenharia pelos impactos que provocam na sociedade em relação aos aspectos econômicos, de segurança das instalações, até mesmo humanos e ambientais.

Os dados fornecidos pela Usina São Francisco contribuíram para realização desta pesquisa. Dados estes que serão utilizados na avaliação e interpretação assertiva de especialista, pois fazem parte de sistema ERP com histórico de cinco anos de lançamentos de Ordens de Serviços na manutenção em colhedoras.

As informações de um banco de dados ERP necessitam de confiabilidade, exigindo análises criteriosas, além do padrão de lançamento adequado. Assim, justifica-se a utilização de Fuzzy para elaboração desta pesquisa, dependendo crucialmente da acurácia de especialista na área de manutenção automotiva.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade tendo como referência uma análise das manutenções preventivas e corretivas.

Apresentar uma ferramenta e demonstrar através da utilização de FCM, a possibilidade de se gerenciar com maior confiabilidade a manutenção da frota de colhedoras de cana-de-açúcar com informações de históricos no sistema ERP no módulo manutenção, de uma empresa, resultando em melhoria contínua nos processos de manutenção e garantindo maior confiabilidade nos processos.

Este trabalho se propõe a utilizar eventos ou parâmetros operacionais característicos, criar uma base de conhecimentos que apresente as interações entre eventos de falha, revelados por parâmetros operacionais, possibilitando uma análise gerencial para o setor de manutenção automotiva.

2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral necessita-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver Mapas Cognitivos Fuzzy Dinâmicos Simplificados, com algoritmo para diagnóstico das condições mecânicas e de confiabilidade mecânica das máquinas;
- Apresentar fundamentação sobre Manutenção Centrada em Confiabilidade, sugerir Mapas Cognitivos Fuzzy, do inglês FCM (*Fuzzy Cognitive Maps*);
- Analisar os dados históricos de manutenção da frota de colhedora de cana da Usina São Francisco;
- Caracterizar o comportamento com base nas ordens de Serviços lançadas no sistema ERP;

- Analisar os resultados obtidos mediante simulações numéricas e experimentais, utilizando um modelo adequado FCM.

2.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma: Capítulo 1 com introdução, Capítulo 2 apresenta os objetivos do trabalho, Capítulo 3 aborda fundamentos e definições com revisão de literatura para um melhor entendimento da proposta dessa pesquisa abordando controle inteligente. O Capítulo 4 conceitua Mapas Cognitivos Fuzzy, aplicados na quantificação da manutenção, o Capítulo 5 conceitua os fundamentos e definições de manutenção e RBMFCM e, finalmente o Capítulo 6 conclui e endereça futuros trabalhos.

2.4 Contribuições esperadas

Espera-se com este trabalho, contribuir para o setor sucroalcooleiro, principalmente no seu processo produtivo em campo, utilizando sistemas inteligentes com o desenvolvimento de uma nova metodologia baseada na identificação de falhas que comprometem a confiabilidade da manutenção automotiva de colhedoras. A metodologia proposta pode ser considerada uma evolução dos Mapas Cognitivos Fuzzy, sendo inovadora e podendo contribuir para auxiliar o setor de manutenção automotiva na tomada de decisões.

Por meio desse conhecimento e aprendizagem, as colhedoras de cana poderão apresentar uma maior confiabilidade mecânica nas operações, aumentando sua produtividade, reduzindo custos e conseqüentemente gerando ganhos ambientais, com menor emissão de gases originados da combustão do motor diesel, redução de vazamentos de lubrificantes do sistema para o solo e redução das perdas de peças por danos resultantes da falta de manutenção ou má qualidade da manutenção.

A qualidade da manutenção agrícola pode ser melhorada por meio da implementação da ISO 9001 e da ISO 14001 conciliada a essa nova tecnologia de gestão. Segundo Barbosa (2015), a ISO 9001 pode ajudar as empresas agrícolas a melhorar a eficiência, a produtividade e a lucratividade, por meio da melhoria dos processos de manutenção e da redução da

frequência das falhas. A ISO 14001 pode contribuir para que as empresas agrícolas reduzam seu impacto ambiental, por meio da melhoria da eficiência energética, do uso de recursos e da gestão de resíduos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cultura da cana-de-açúcar e a colheita mecanizada

Segundo Segato *et al.* (2006), no Brasil, há indícios de que o cultivo da cana-de-açúcar seja anterior à época do descobrimento, mas seu desenvolvimento se deu posteriormente, com a criação de engenhos e plantações com mudas trazidas pelos portugueses. Já em fins do século XVI, os Estados de Pernambuco e Bahia contavam com mais de centenas de engenhos, tendo a cultura florescido de tal modo que o Brasil, até 1650, liderou a produção mundial de açúcar, com grande introdução no mercado europeu.

Depois de 1615, a cultura da cana atingiu o planalto paulista, com a região de Itu se destacando, no século XVII, como o maior centro açucareiro de São Paulo. Em 1798, Frei Gaspar relatou que essa cultura já estava negligenciada em Santos e em São Vicente (SEGATO *et al.*, 2006).

A cana-de-açúcar é uma planta que possui cultivo superior a dois anos, caracterizado como semi perene, como mostra a Figura 1. Pertence ao gênero *Saccharum* L. e é membro da família das gramíneas, que são oriundas de regiões de climas tropicais na Ásia Central (SEABRA, 2008).

Desde o Proálcool (1986), a importância comercial do etanol cresceu, inicialmente devido às altas do preço do petróleo, mas depois se tornou mais clara a percepção da importância dos combustíveis renováveis para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Figura 1 - Toletes de cana-de-açúcar após corte mecanizado



Fonte: Autor (2023)

Os principais produtos obtidos da cana-de-açúcar são o álcool, o açúcar (sacarose) e o caldo de cana, conhecido em diversas regiões do Brasil como garapa. Esses produtos são obtidos a partir de processos distintos realizados com o caldo extraído da cana (RIBEIRO *et al.*, 2015).

O setor sucroalcooleiro representa 2% do PIB nacional porque, segundo Finguerut (2019), equivale a 10% do valor bruto total do agronegócio.

O Brasil é o maior produtor do mundo de cana-de-açúcar, além do combustível e do alimento humano, o seu bagaço pode ser utilizado para a produção de energia e papel, enquanto a ponta das folhas da cana podem ser inseridas na alimentação animal (PEREIRA; GROTO, 2018).

O setor agrícola canavieiro é um setor com diversas operações severas aos equipamentos nele utilizado, principalmente em se tratando da colheita mecanizada. Para se atender a grande demanda por matéria prima na usina, as colhedoras de cana devem trabalhar o máximo possível de horas durante as 24 (vinte e quatro) horas do dia no período de safra, normalmente chegando em média a 16 (dezesesseis) horas trabalhadas por dia, essa grande exigência produtiva somada a sazonalidade, os terrenos hostis, a qualidade dos operadores e as características da cana-de-açúcar, resultam em uma grande exigência mecânica desses equipamentos.

Nota-se, conforme a Figura 2, que a colheita da cana e seu ambiente demandam alto desempenho mecânico dos equipamentos/máquinas que operam no local. Sendo uma cultura bastante agressiva e hostil, observa-se que com o término da cana queimada no estado de São Paulo, a presença da palha no processo, ainda exige muito mais dos equipamentos.

Com o desenvolvimento relacionado a mecanização agrícola, nasceu a grande necessidade de confiabilidade nessas manutenções. Os equipamentos cada vez mais tecnológicos, também apresentam maiores problemas relacionados a sua configuração, sensores e sistemas programados.

Os sistemas eletrônicos das máquinas agrícolas demandam a utilização de *rasters* para identificações mais precisas de problemas e diagnósticos para correções, nesses equipamentos também temos os

computadores de bordo, que apresentam informações sobre o desempenho e alerta por sensores de falha.

Figura 2 - Cana-de-açúcar em área de colheita mecanizada



Fonte: Autor (2023)

Uma das formas de atingir a confiabilidade no desempenho das máquinas, é garantir a qualidade da manutenção dos equipamentos através do uso de componentes sobressalentes de boa qualidade, de procedimentos adequados e de processos de monitoramento dos índices de falha e de reincidência dos equipamentos.

Segundo Kardec e Nascif (2009), nem sempre são fornecidas informações precisas pelos fabricantes para adotar planos de manutenções preventivas, além disso ainda temos outros fatores que influenciam na degradação dos equipamentos, como as condições ambientais e operacionais, assim as definições de periodicidade se tornam algo particular de cada empresa.

A colhedora de cana-de-açúcar viabiliza o corte de cana crua, porém provoca perdas produtivas pelas dificuldades apresentadas pelas características da cultura, como o perfil do terreno e densidade de palha, podendo favorecer a realização do corte acima da altura ótima ou, até mesmo, o enterramento desses mecanismos. Esses fatos provocam perdas, pior qualidade de matéria-prima, desgaste mecânico excessivo, sobrecarga

dos elementos de transmissão, aumento da exigência de potência e danos às soqueiras (RAFULL; SOUZA, 2006).

A principal dificuldade em se realizar diagnóstico de falhas em colhedoras, reside no fato de que estas falhas possuem um comportamento transiente e não linear decorrente da complexidade de algumas estruturas e alguns sistemas.

Muitos dados dos processos de manutenção automotiva são atualmente armazenados em sistemas gerenciadores de banco de dados, pertencentes ao sistema ERP, desde a abertura da ordem de serviço até o fechamento do serviço. Com todas as informações lançadas nesse sistema, pode-se gerar indicadores quando administradas adequadamente.

As empresas que utilizam o sistema ERP e possuem um setor de PCM bem estruturado, geram uma imensa quantidade de dados diariamente, e que normalmente não são processados de forma manual. Essa grande quantidade de dados gera uma imensa mão de obra e demanda tempo de serviço, porém se realizada de maneira automatizada, essa imensa quantidade de dados pode gerar soluções inteligentes e imediatas para o gerenciamento da manutenção, tomada de decisões e principalmente diagnósticos.

A cana-de-açúcar é uma cultura sazonal, sua operação mecânica fica propícia às diversas variáveis, as quais não estão no controle dos produtores, como o clima, por exemplo.

O conhecimento do comportamento de cada máquina em conjunto com a manutenção preventiva, permite um maior controle de custos, permitindo que a manutenção não seja considerada como mais uma variável, aumentando a previsibilidade de quebras, da vida útil dos itens e conseqüentemente dos gastos e melhoria na disponibilidade das máquinas.

3.2 Tipo de manutenção de equipamentos

Nota-se que a manutenção de equipamentos, cada vez mais, conquista seu espaço nas empresas, principalmente pelo aumento constante de equipamentos mecânicos em suas plantas, visando garantir a

produtividade esperada e estender ao máximo a vida útil de cada máquina com qualidade na produção e redução de custos operacionais.

A grande maioria das usinas sucroalcooleiras possuem oficinas com pequeno porte e com estruturas pouco desenvolvidas, dependendo muito de novos recursos que as direcionem à assertividade nas manutenções. Como podemos notar na Figura 3, as oficinas de manutenções automotivas no setor canavieiro, normalmente são localizadas em ambiente rural, em condições que exigem ainda mais conhecimento técnico dos mecânicos. Precisa-se ter o domínio do trabalho nessas condições e técnicas adequadas para prevenir a contaminação de sistemas hidráulicos.

Figura 3 - Estrutura de oficina automotiva



Fonte: Autor (2023)

A disponibilidade mecânica é a probabilidade de um sistema, quando em operação nas condições definidas em projeto, apresentar-se operacional em um determinado momento (MODARRES; KRIVSTOV, 1999).

Com esse aumento de foco para o setor de manutenção, diversas técnicas, métodos e modelos de trabalho, estão surgindo, podendo ser criados dois grupos básicos, que auxiliam este setor, a manutenção corretiva e a manutenção preventiva.

Dentro do escopo da manutenção preventiva podemos enquadrar as manutenções preditivas, que utilizam algum tipo de equipamento de aferição

e suas intervenções não são determinadas por intervalo de tempo, mas por condições atuais dos equipamentos verificadas após aferições.

Com a chegada constante de novas tecnologias e com a modernização dos sistemas de aferições de avarias nos equipamentos, temos um novo ramo da manutenção, onde podemos chamar de manutenção preditiva determinada por algoritmos.

A manutenção preditiva determinada por algoritmos consegue atingir resultados satisfatórios com a utilização de algoritmos para monitoramento do comportamento de um sistema, identificando falhas prematuramente e sem necessidade de intervenções humanas para aferições durante o processo.

Segundo Silva (2005), ao realizar um planejamento para manutenção preventiva devem ser observados os seguintes custos:

- Custo de interferência na produção em função da redução da produtividade. Estes custos são ocasionados pelas paradas realizadas nas máquinas e equipamentos durante os processos de fabricação;
- Custos com as perdas com refugos, desperdício de matéria-prima e insumos, ocasionados devido falhas nos equipamentos.

Segundo estudos apresentados pelo autor Monchy (1987), o conceito da manutenção vem se modificando ao longo do tempo e as ações provocadas por estas mudanças podem ser claramente observadas nos artigos, pesquisas e levantamentos por eles realizados.

A manutenção visa preservar o estado funcional de um equipamento ou sistema, mantê-lo funcionando ou devolver o equipamento para operação após um dano com a máxima capacidade possível, o mais próximo de suas qualidades originais.

De forma abrangente, a manutenção dos equipamentos e máquinas, envolvem conhecimentos técnicos e procedimentos administrativos com a função de conservar as características de funcionalidade, segurança, higiene, confiabilidade do padrão de conforto.

Com o avanço do setor de manutenção, também surgiram outros setores de apoio, como é o caso do setor de Planejamento e Controle da Manutenção – PCM, sendo um setor composto por equipes de manutenção e

serviços para aumentar a confiabilidade, disponibilidade e qualidade dos equipamentos e ativos, trazendo também melhorias na rotina dos técnicos e gestores que executam esses serviços.

Desse modo, confiabilidade pode ser definido como a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condição especificada, durante um dado intervalo de tempo.

Portanto, é importante destacar os conceitos de defeito e falha, estritamente relacionados à funcionalidade e confiabilidade:

- Defeito – qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos ou ocorrência em um item. Pode ou não afetar o seu funcionamento como um todo, no entanto, em um período, pode acarretar indisponibilidade de uso do equipamento em questão;
- Falha – término da capacidade de um item em desempenhar a função requerida. Depois da falha, o item terá uma pane. A falha é um evento, diferentemente de pane, que é um estado. Pane é o estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos.

Nos fundamentos da manutenção para um sistema de manutenção, há um conjunto de procedimentos organizados para gerenciar os serviços a serem feitos. Esta organização deve considerar as características gerais e específicas do local e/ou equipamento em que se dará a manutenção. Dentre as características a serem objeto de observação, ressalta-se:

- Tipo de uso do equipamento;
- Dimensões e complexidade funcional;
- Desempenho mínimo que tal equipamento deve cumprir;
- Prazo aceitável para paradas corretivas;
- Recursos financeiros, materiais e estruturais para tal manutenção;
- Entre outros que a Engenharia, PCM ou Equipe de Manutenção envolvida julgue o que é necessário ser feito.

De um modo geral, além de conhecer as características é conveniente ter a concepção dos tipos existentes de manutenção, pois isso indicará qual a melhor maneira de intervir no equipamento ou local. Os tipos de manutenção apontam para a intervenção mais adequada a ser realizada.

Não é escopo desse trabalho fundamentar os tipos de manutenções, e sim, uma breve definição seguida de possíveis exemplos de paradas para manutenção em colhedoras de cana.

Alsyouf (2009), sugere em sua pesquisa que os métodos de manutenção podem assumir algumas formas, que serão mostradas a seguir:

3.2.1 Manutenção corretiva

Segundo Marçal (2000), a manutenção corretiva é a que se realiza sobre uma máquina que esteja com funcionamento comprometido ou tenha parado de funcionar, devido a alguma falha. Está máquina sofrerá uma intervenção com a finalidade de ser consertada e ser colocada novamente em serviço.

A manutenção corretiva é a intervenção realizada após a falha da máquina, sem antecipação da intervenção, sendo normalmente uma manutenção que resulta em altos custos de manutenção, pois pode ocorrer a perda da peça e também danificar outros componentes do equipamento e com alto custo por parada repentina, atrasando o processo de produção.

Segundo Slack, Chambers e Johnston (2002), é a forma mais simples e mais primitiva de manutenção deixar as instalações continuarem a operar até que quebrem. O trabalho de manutenção é realizado somente após a quebra do equipamento ter ocorrido.

Aguardar por uma manutenção corretiva também pode acarretar um aumento significativo de riscos de acidentes nos processos.

Segundo Otani e Machado (2008), existem dois tipos de manutenções corretivas, sendo a Manutenção Corretiva Não Planejada e a Manutenção Corretiva Planejada.

A Manutenção Corretiva Não Planejada é a correção da falha ou do desempenho abaixo do esperado, sendo realizada sempre após a ocorrência do fato, sem acompanhamento ou planejamento anterior, aleatoriamente. E a Manutenção Corretiva Planejada ocorrerá quando a manutenção é preparada, porém com dano já identificado, podendo ter acompanhamento preditivo.

Kardec e Nascif (2009) afirmam que a adoção de uma política de manutenção predominantemente corretiva e não planejada, além de implicar em altos custos, deixa a empresa à mercê da aleatoriedade, sendo os impactos da falha, sejam eles catastróficos ou não, apenas observados após a ocorrência da mesma.

3.2.2 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é realizada de forma antecipada às quebras, evitando paradas inesperadas dos equipamentos, sendo esta realizada de forma programada e normalmente por intervalo de tempo, porém pode ser de maneira preditiva, com intervalos definidos por aferições e monitoramento, com sensores por exemplo.

Segundo Barbalho (2016), durante muitos anos, o desperdício de recursos materiais e humanos causaram grandes impactos na produção e nos negócios, e com a chegada das tecnologias e avanços nos sistemas, essa condição pôde ser contemplada com melhorias contínuas, em especial, com aplicação da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) e da Manutenção Preventiva dentro das indústrias.

A maneira preventiva de se trabalhar garante redução nos custos operacionais e confiabilidade nos processos, garantindo maior eficiência na produção e qualidade no produto.

De maneira próxima, Kardec e Nascif (2005) apresentam a manutenção preventiva como sendo uma manutenção desempenhada para manter um item em condições satisfatórias de operação, através de inspeções sistemáticas com intervalo de tempo fixo, detecção e prevenção de falhas incipientes.

No setor canavieiro é muito comum a utilização do método de manutenção linear, onde a parada da máquina é realizada durante a safra e é

realizada uma “minirreforma” no equipamento, substituindo itens antes de sua quebra.

Cavalcante e Almeida (2005) salientam que a busca pela alta confiabilidade dos equipamentos é essencial, sendo que cabe à manutenção preventiva tentar se antecipar às falhas que possam ocorrer, minimizando também os custos gerados pela manutenção corretiva.

3.2.3 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é realizada através de monitoramento ou acompanhamento periódico dos desgastes dos sistemas das máquinas através de ferramentas, métodos de aferições, visando fazer a manutenção somente quando e se houver necessidade, com base nos resultados dessas aferições, interferindo pouco na máquina.

A manutenção preditiva deverá ser feita de forma temporal e de acordo com especificações dos fabricantes ou análise de dados comportamentais do sistema, como por exemplo, o mesmo rolamento citado na manutenção corretiva, pode ser preventivamente substituído de acordo com especificações dos fabricantes sintonizadas com as condições de operação e trabalho dos mesmos. Assim, nesse caso, pode-se até mesmo analisar o tipo de lubrificante adequado à temperatura e umidade do ambiente de trabalho dos motores, nesse caso específico dos rolamentos. De um modo geral, a previsão de falhas ou defeitos é feito através de um monitoramento preciso que antecede as paradas funcionais não previstas (PAOLETTI; HERMAN, 2015).

Segundo Kardec e Nascif (2005), a manutenção sob condição é caracterizada pela realização de um monitoramento da modificação dos parâmetros e das condições de desempenho do equipamento. Neste tipo de manutenção, os equipamentos são monitorados sem a necessidade de parada de produção, o que faz com que o sistema produtivo tenha um grande ganho no quesito disponibilidade.

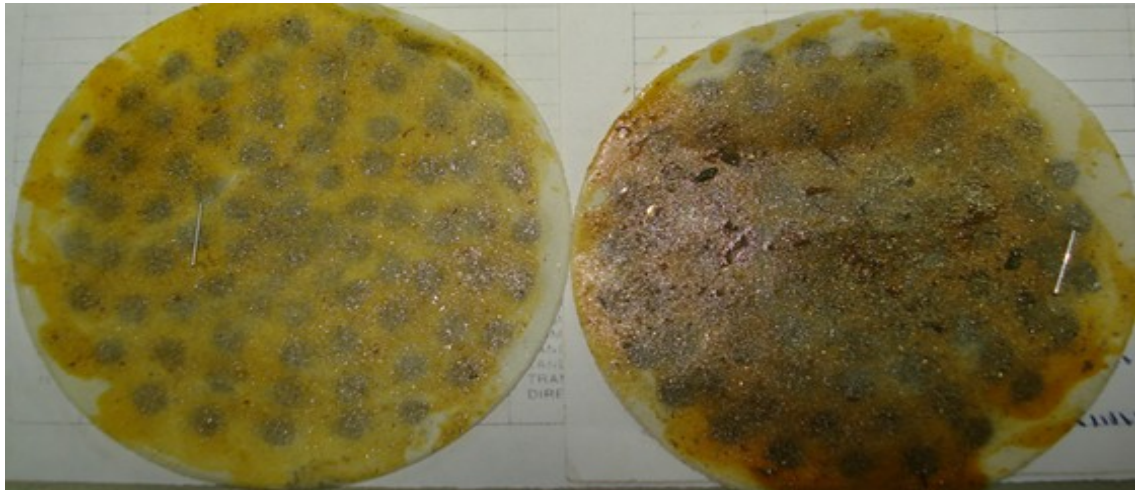
Um dos métodos de manutenção preditiva muito utilizado nas colhedoras de cana-de-açúcar é a análise de óleo, justificado devido ao grande porte do sistema hidráulico da máquina, sendo em torno de 600 litros de lubrificante em todo sistema.

A análise pode ser realizada enviando a amostra coletada para um laboratório especializado, resultando em uma análise mais refinada e complexa ou até mesmo a análise com a utilização de mantas filtro, com o resultado instantâneo, porém menos específico, conforme podemos visualizar na Figura 4.

Nota-se que existem vestígios de metais significativos nas amostras, exigindo uma programação de parada do equipamento para manutenção.

O ponto primordial da manutenção preditiva é a periodicidade determinada para realização de aferições, para que se tenha uma programação de parada confiável e preserve todo o sistema.

Figura 4 - Resultado da análise de lubrificante através de filtragem por manta



Fonte: Autor (2023)

Estamos em uma era tecnológica, em todos os campos de atuação, assim temos a manutenção definida por algoritmos, com a evolução da tecnologia e das ferramentas de monitoramento. Atualmente, temos muitos sistemas controlados por sensores, onde os mesmos indicam momento correto de se realizar uma vistoria no equipamento, ou até uma possível intervenção devido a presença de algumas características anormais, como por exemplo excesso de temperatura, excesso de vibração, viscosidades entre outros diversos.

Uma insigne vantagem de um sistema monitorado por sensores é não necessitar das intervenções humanas, reduzindo mão de obra, aumentando a confiabilidade e eliminando interrupções para aferições, monitorando um grande pátio de máquinas de maneira instantânea, elaborando históricos de falhas por máquinas, customizando as necessidades e identificando possíveis falhas conforme cada atividade e perfil de operação da empresa.

3.2.4 Manutenção por algoritmo

Considerando os intervalos pré-definidos por linhas de tempo na manutenção preventiva e as manutenções pré-determinadas pelas aferições de sistemas com equipamentos específicos na manutenção preditiva, podemos considerar que temos mais uma manutenção existente, a manutenção preventiva determinada por indicadores gerados por algoritmos.

Essa manutenção é realizada por momentos de intervenções mecânicas determinados através de qualquer ferramenta que utilize os dados fornecidos pelas próprias máquinas ou gerados por setores de Planejamento e Controle de Manutenção, que através de algoritmos farão uma análise inteligente dos melhores momentos de intervenção de acordo com o tipo de equipamento, o tipo de atividade, horas trabalhadas, intervalo de troca de peças, manutenções corretivas, desgastes de peças e demais indicadores mecânicos.

Podemos considerar o uso de ferramenta FCM como uma manutenção por algoritmo, embasada em estruturação algorítmica com resultados embasados nos históricos de frota de equipamentos similares.

Existem inúmeras soluções com maior sofisticação tecnológica mencionada na literatura, como por exemplo: um sistema de predição de alarmes com a finalidade de auxiliar a implantação de uma política de manutenção industrial e de se constituir em uma ferramenta gerencial de apoio à tomada de decisão. Outro exemplo, de forma fundamentada, através de metodologias apropriadas, pode ser definido as políticas de manutenção adequadas a cada equipamento e aos componentes neles inseridos.

Como exemplos específicos para a área de manutenção, pode-se citar o trabalho de Mosallam *et al.* (2011), o qual apresenta uma técnica de mineração de dados para relações não-lineares, através da identificação de desvios ou mudança de caráter nas relações identificadas, baseada em incerteza simétrica (SU – *Symmetrical Uncertainty e L-method*), objetivando a previsão de desgaste e a necessidade de manutenção.

O trabalho de Yang (2003) propõe um método para previsão de falhas baseado em condições e plano de processamento, para manutenção preditiva. Esse método é baseado em Redes de Petri e filtros de Kalman, no qual valores dos sensores são usados como entrada para o filtro de Kalman, estimando o estado do equipamento. Uma vez que esse valor estimado

ultrapassa um valor limiar, a falha é prevista, e então medidas para a execução preventiva devem ser tomadas.

Os reparos e recondiçõamentos de máquinas, na maioria das empresas, são planejados a partir de estatísticas, que são geradas apenas quando se tem informações precisas em banco de dados.

A operação sistemática gerenciada por meio de análise de dados em sistema ERP, gerados pela abertura de Ordens de Serviço de Manutenção, identificando os sistemas principais, mecânico, hidráulico ou elétrico da colhedora, nos permite ter acesso a diversos indicadores de manutenção. Desse modo, as ferramentas propostas devem ser utilizadas de forma a instruir e/ou auxiliar os profissionais de manutenção.

3.3 Manutenção centrada na confiabilidade

A manutenção tem-se desenvolvido a cada década, deixando de ter um papel de coadjuvante para se ter um papel fundamental na produção e resultados das empresas, com isso diversos métodos surgem visando o aperfeiçoamento dos processos.

Segundo Monchy (1987), a manutenção deve sempre ser discutida e adaptada a novas tecnologias, é um desafio chave que reflete diretamente na produtividade das empresas. As manutenções quando bem realizadas e planejadas nos darão maiores disponibilidades dos equipamentos, garantia de maior produtividade e redução de custos nas operações, para garantirmos essa disponibilidade mecânica precisamos implantar novos métodos de melhoria no gerenciamento da manutenção.

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) é um método que visa garantir que as atividades de manutenção sejam executadas de maneira eficiente, econômica, confiável e segura.

Segundo Rausand e Øien (1996), um produto confiável é aquele em que o consumidor pode contar para realizar o que ele espera do mesmo por um período de tempo. Um sistema perfeito é constituído de componentes que durante um período pré-determinado de tempo desenvolvem a atividade para qual foi projetado sem ocorrência de falhas.

A MCC é basicamente um programa de gerenciamento de integridade

de máquinas e equipamentos, nesse caso das colhedoras de cana-de-açúcar, sendo do início ao fim. Além de se preocupar com a disponibilidade mecânica, a confiabilidade abrange também a segurança das máquinas, item de grande importância na operação.

Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) ou do inglês, *Reliability Centered Maintenance* – RMC é a prática de um método estruturado que determina a melhor atuação de manutenção para um equipamento ou edificação, estabelecendo uma metodologia de identificação de necessidades de manutenção em processos físicos ou industriais. Esta metodologia por ser conferida através da análise de dados gerados na manutenção pelo setor de Planejamento e Controle da Manutenção, sugeridas nessa pesquisa, serão apresentadas no Quadro 1 de forma básica referente a manutenções corretivas. Maiores detalhes serão abordados no final dessa seção.

Dentro desse contexto temos a SHM – *Structural Health Monitoring*, resumidamente definido como um processo de implementação de estratégias para detecção de falhas em estruturas, embasado nas respostas dinâmicas da estrutura através de diversos sensores e utilizando modelos matemáticos, gerando cruzamento de informações, indicadores de falhas com análises estatísticas.

Segundo Doebling *et al.* (1998) existem quatro sub níveis no processo de SHM baseados em medidas relacionadas ao dano:

- Nível 1: Detecção;
- Nível 2: Detecção e localização;
- Nível 3: Detecção, localização e quantificação de severidade;
- Nível 4: Detecção, localização, quantificação de severidade e obtenção de prognósticos.

Um breve histórico, na década de 1960, a MCC ganhou “força” com publicações de levantamentos na época de 1960, que originou um documento lançado em 1978 com o título “*Reliability Centered Maintenance* – RCM”, e desde então é considerado um dos mais importantes documentos de gestão

de manutenção em todos os setores da indústria, e outras áreas como, por exemplo, edificações.

O Quadro 1 numera os passos básicos realizados pelo setor de PCM em um setor de manutenção automotiva agrícola tradicional para abertura de uma Ordem de Serviço de manutenção identificada como corretiva, esses dados lançados no sistema e essa avaliação técnica é muito importante para que tenhamos dados confiáveis. Se nota que a identificação e o diagnóstico são ações consideradas primordiais.

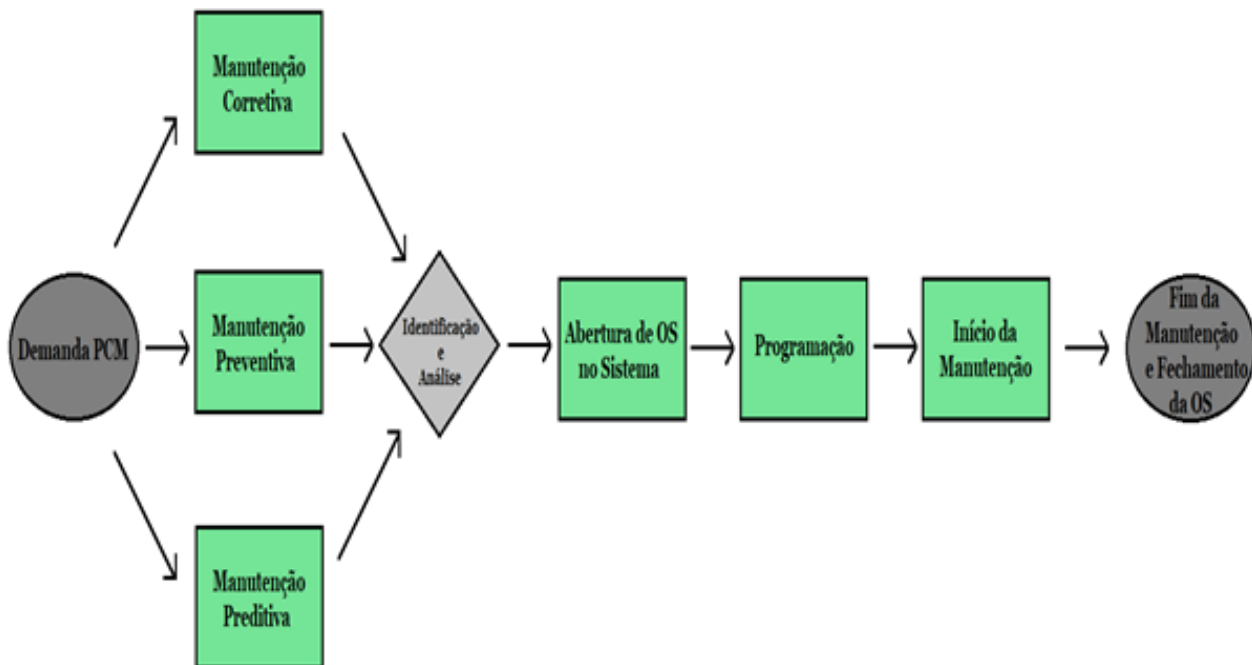
Quadro 1 - Abertura de ordem de serviço

Item	Descrição das Ações de Manutenção Corretiva
01	Abrir Ordem de Serviço, identificada como manutenção corretiva
02	Introdução de dados, diagnóstico inicial e prazo
03	Identificação do sistema (mecânico / elétrico ou hidráulico)
04	Identificação do problema
05	Identificação e requisição de peças
06	Lançar tempo de serviço
07	Corrigir problemas e fechar OS

Fonte: Autor (2023)

Na Figura 5 temos um fluxograma, para melhor representação dos processos realizados pelo PCM referentes às demandas de manutenção, complementando as informações contidas no Quadro 1. A Ordem de Serviço deve ter um início (abertura), um meio (processos lançados dentro da OS) e um fim (fechamento da OS).

Figura 5 - Fluxograma abertura de Ordem de Serviço



Fonte: Autor (2023)

Quando um equipamento sofre qualquer tipo de intervenção (preventiva, preditiva ou corretiva), essa intervenção deve ser analisada para

se dar início a abertura da Ordem de Serviço – OS. Após abertura da OS, se inicia a manutenção, assim as informações são lançadas dentro dessa OS no sistema ERP de manutenção da empresa. Qualquer ação que for realizada durante a manutenção do equipamento deverá ser informada na OS, como exemplo podemos citar: requisição de peças, serviços de terceiros, horas de mão de obra (mecânicos), novos danos encontrados, entre outros itens. Após finalizada a intervenção, a OS deverá ser encerrada no sistema imediatamente.

Todas as informações lançadas no sistema ERP referente as Ordens de Serviços - OS estruturam um banco de dados que oferece indicadores de manutenção (KPIs), esses indicadores poderão ser utilizados para tomadas de decisões e diferentes análises da qualidade de manutenção e das condições mecânicas das máquinas.

O trabalho Mendonça *et al.* (2017), declara que a MCC está organizada com o princípio primordial de que todas as ações de manutenção necessitam ser comprovadas, antes de sua execução. O parâmetro de comprovação deve condizer com disponibilidade, segurança, economia e condições ambientais favoráveis ao equipamento e ao local no qual este está inserido. O trabalho supracitado juntamente com a MCC priorizou o desenvolvimento de uma manutenção arquitetada, oferecendo uma ampla visão do sistema, disponibilidade e a segurança necessária.

Normalmente as máquinas agrícolas na manutenção automotiva são divididas em sistemas operacionais com o objetivo de facilitar o reconhecimento de suas funções e componentes. Para efeito de desenvolvimento deste estudo, a colhedora foi dividida de forma objetiva em três sistemas, a saber:

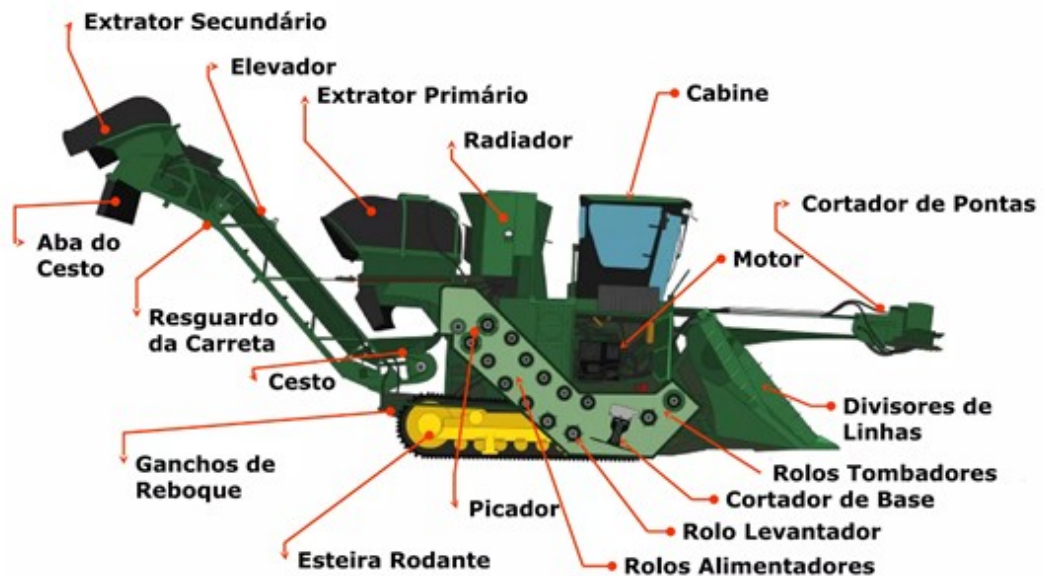
1. Sistema hidráulico;
2. Sistema mecânico (motor, estrutura e material rodante);
3. Sistema elétrico.

As empresas agrícolas do setor canavieiro utilizam módulos de manutenção em seu sistema de software ERP, onde são lançadas todas as informações referentes as manutenções automotivas de sua frota,

possibilitando a geração de indicadores com os demais dados que forem necessários para determinação também dos equipamentos reincidentes. Desta forma, possibilita o uso de árvores de decisão e inteligência artificial.

A Figura 6 identifica cada sistema de uma colhedora de cana-de-açúcar, de forma básica em seus macros sistemas principais. Temos a grande presença de sistemas hidráulicos e um ciclo operacional que se inicia na colheita da cana, seu corte, limpeza (retirada da palha) até o transporte e despejo pelos elevadores transportadores nos transbordos de cana picada.

Figura 6 - Colhedora de cana-de-açúcar e sistemas



Fonte: Fabricante John Deere (2018)

3.4 Planejamento e Controle de Manutenção – PCM

Segundo Branco Filho (2008), o PCM é responsável por preparar, programar, verificar o resultado da execução das tarefas de manutenção e adotar medidas de correção de desvios para a consecução dos objetivos e das metas da empresa e valores pré-estabelecidos, utilizando as ferramentas disponibilizadas pela empresa.

Para que se obtenha êxito nesses estudos, é de fundamental importância que a empresa tenha uma equipe de PCM – Planejamento e Controle de Manutenção bem estruturada, e que as Ordens de Serviços e demais informações lançadas no sistema sejam confiáveis e padronizadas,

pois estas serão as bases das análises realizadas. Toda busca será feita diretamente no banco de dados transacional do sistema de gestão de informações adotado pelo setor de manutenção automotiva.

O sistema possui milhares de registros com as informações relativas aos diversos equipamentos que passam por processos de manutenção diariamente.

Para um sistema de manutenção é necessário se ter uma estrutura de documentos e registros de informações que devem sempre ser atualizados, com um sistema ERP confiável e apontamentos em OS – Ordens de Serviços constantes e corretos pelo setor de PCM, possibilitando a utilização de dados lançados no sistema *ERP - Enterprise Resource Planning*.

Conforme o planejamento da manutenção, temos o *checklist* de verificação mecânica, sendo uma lista de procedimentos ou referências padronizadas na quais são inseridas anotações das constatações técnicas e dos dados encontrados na inspeção do sistema elétrico ou mecânico ou hidráulico. O *checklist* subsidia a alimentação das OS no sistema (banco de dados).

Deste modo, tem como objetivo primordial favorecer o levantamento dos resultados “*in loco*”, de forma a tornar a vistoria dinâmica e proporcionar condição técnica de qualidade em suas condições construtivas, da própria manutenção e de uso dos diversos sistemas construtivos interligados.

Segundo Fernandes (2004), os indicadores de desempenho são números que descrevem a realidade de uma organização, representam a quantificação dos processos.

Os indicadores serão definidos conforme a realidade de cada empresa, podendo citar alguns com grande utilização, sendo a disponibilidade, o consumo de diesel, o consumo de lubrificantes, a vida útil de material rodante, MTTR (*Mean Time to Repair* ou seja, o tempo médio para reparo) e MTBF (*Mean Time Between Failures*, significa tempo médio entre falhas), o tempo de serviço e indicadores de custos dessas manutenções.

Para o controle de custos devemos utilizar o CRM – Custo de Reparo e Manutenção, disponibilizado pelo setor financeiro, onde se tem os custos de peças, serviços de terceiros, serviços internos, custo com pneus e gasto de

lubrificantes. Podendo gerar um indicador de reais por tonelada de cana (R\$/tonelada), que servirá como balizador em decisões gerenciais e definição de metas com a equipe de manutenção.

Conforme Fischmann e Zilber (1999), esses indicadores auxiliam a gestão na tomada de decisões e reestudo dos investimentos, identificação da performance do negócio, além de auxiliam no alcance de suas metas.

A abertura de Ordem de Serviços de manutenção (itens relacionados no Quadro 1) viabiliza o planejamento, norteia a sequência de procedimentos a serem executados e possibilita um histórico das informações coletadas, fornecendo parâmetros para a qualidade da inspeção feita.

As falhas ou defeitos encontrados durante a abertura da Ordem de Serviço de manutenção devem ser relatados no sistema, contemplando também as ações que contrariem as recomendações constantes no manual do fabricante e uso (ALGHATHBAR; WIJESEKERA, 2004).

A prioridade quanto a atividade a ser desenvolvida na manutenção também deve ser determinada. A prioridade é o espaço de tempo para a averiguação da necessidade de manutenção e o início da mesma. As prioridades são estipuladas de acordo com a importância e a natureza da máquina (PAOLETTI; HERMAN, 2015): Emergencial ou Prioridade 1: manutenção executada no momento da constatação da necessidade. Ex.: aumento de temperatura anormal no motor (falha). Urgência ou Prioridade 2: deve ser executada o mais breve possível, não sendo passadas 24 horas após a constatação da necessidade. Ex.: vazamento de óleo baixo (defeito). Necessária ou Prioridade 3: ações da manutenção que poderão ser feitas no prazo de até uma semana. Ex.: manutenção preventiva como análise de lubrificação. Desejável ou Prioridade 4: manutenção programada/datada, mas que não pode deixar de ser realizada. Ex.: manutenção preditiva como a análise de óleo.

O tempo e prioridade das ações serão de acordo com a política adotada.

A priori, são apresentadas sugestões das principais ações, de forma resumida, adotadas pelos autores ou especialistas.

A Figura 7 mostra como é realizada a manutenção dos equipamentos no campo de colheita e o ambiente hostil ao seu entorno e a céu aberto: um

caminhão furgão (baú), onde a oficina realiza as intervenções preventivas básicas e corretivas com pouca estrutura disponível, por isso a importância da assertividade na escolha das ferramentas e peças destinadas ao campo.

Como sugerido, na introdução desse trabalho, uma das contribuições dessa pesquisa será modelar o gerenciamento por meio de uma Máquina de Estados. Sendo necessário definir sua frequência de execução, através de modelos adequados. Assim, de acordo com o conhecimento dos especialistas, desenvolver um modelo matemático que represente a Manutenção Centrada na Confiabilidade, que priorize a representação dos conceitos de falha/defeito potencial e falha/defeito funcional. Estes estados podem ser mais bem visualizados através de uma máquina de estados, ilustrada na Figura 8, na qual são identificadas as condições típicas de uma manutenção nos sistemas principais de uma colhedora de cana.

Figura 7 - Colhedora e furgão oficina, manutenção no campo



Fonte: Autor (2023)

A Máquina de Estados Finitos (MEF) explica de forma discreta a ideia de como deverá ocorrer a manutenção de um modo geral em colhedoras de cana, podendo seguir o fluxograma conforme Figura 8.

A partir das condições averiguadas pode disparar o evento “A” e gerar diretamente uma manutenção corretiva, a qual também pode ser gerada via uma falha ou um defeito.

De um modo geral, a Máquina de Estados, de acordo com o resultado

da análise dos dados lançados no sistema, poderá indicar quais os pontos críticos relacionados a manutenção das colhedoras de cana.

Segundo Sherwin (2000), a modernização constante dos sistemas produtivos, fazem com que os processos tendem a ser cada vez mais exigidos em índices de confiabilidade e redução de custos, fazendo com que seja extremamente importante considerar quaisquer atividades, sejam elas previstas ou imprevistas que provoquem paradas no sistema produtivo.

Segundo Pinto e Xavier (2001), existe uma forma matemática de expressar a confiabilidade de um equipamento, conforme equação a seguir:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

(1)

Onde:

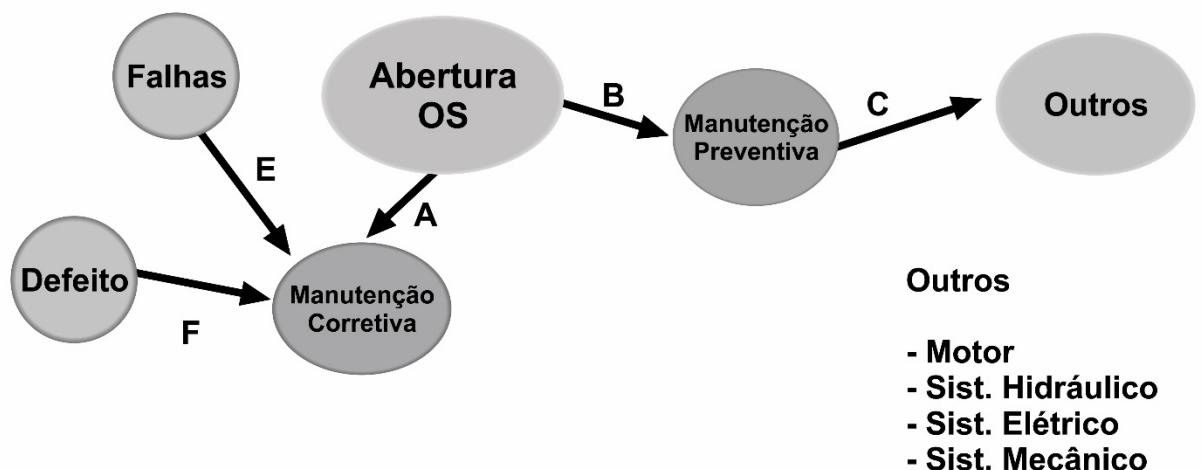
$R(t)$ = confiabilidade a qualquer tempo t

e = base dos logaritmos naturais ou neperianos ($e = 2,718...$)

λ = taxa de falhas (número total de falhas por período de operação)

t = tempo previsto de operação.

Figura 8 - Máquina de Estados



Fonte: Autor (2023)

3.5 Mapas cognitivos Fuzzy – Fuzzy Cognitive Maps (FCMs)

Os *Fuzzy Cognitive Maps* (FCMs) são usados em diversas disciplinas devido a sua flexibilidade e capacidade de modelar sistemas complexos.

Em medicina e saúde, os FCMs foram usados para modelar a progressão de doenças e auxiliar na tomada de decisão clínica. Papageorgiou (2014), utilizou FCMs para modelar a progressão da doença de Alzheimer e determinar a eficácia de diferentes intervenções terapêuticas.

No campo da engenharia de controle e automação, os FCMs foram aplicados para melhorar a performance e robustez dos sistemas. Os trabalhos de Song e Chong (2013) e Wei *et al.* (2016), exemplificam o uso de FCMs em sistemas de controle Fuzzy.

Na área ambiental, os FCMs foram utilizados na avaliação dos impactos de políticas de gestão de recursos. Kumar e Gohil (2015) usaram FCMs para avaliar os efeitos das políticas de gestão da água na Índia.

Esses são apenas alguns exemplos do uso dos FCMs nas últimas décadas, demonstrando sua versatilidade e utilidade em diferentes campos.

Trabalhos anteriores usaram técnicas Fuzzy, DCN (*Dynamic Cognitive Networks*) e FCM para uso em controladores PID adaptativos nos mais diversos processos.

Na dissertação de Ferreira (2009), comparou-se técnicas de controle Fuzzy, PI (Controlador Proporcional Integral) e controle adaptativo em um processo de fabricação de papel reciclado.

No trabalho de Wang *et al.* (2012), são apresentados ganhos em controle de energia em elevadores com sistema Fuzzy-PID.

Fernandes (2005), sugeriu um modelo de supervisão utilizando lógica Fuzzy para um sistema de geração de energia híbrido, alternando o uso de três tipos de geração de energia (gerador movido a diesel, banco de baterias e gerador eólico) a fim da maior economia de recursos.

Lima e Serra (2015), propuseram um controlador Fuzzy robusto implementado para visualização e controle de um processo térmico. Nele, um algoritmo FCM de agrupamento estima os parâmetros anteriores do sistema e o número de regras de um modelo Fuzzy do tipo Takagi-Sugeno.

Yesil *et al.* (2013), apresentaram dois artigos: o primeiro com um controlador Fuzzy-PID auto sintonizador (*self-tuning*) baseados em

apoderamento *online* das regras. O segundo apresentou um FCM para a sintonia dos parâmetros de controladores PI aplicado a um sistema não linear. Esses controladores não conseguem resultados satisfatórios o suficiente nesse tipo de sistema, pela diferença em suas propriedades estáticas e dinâmicas.

No trabalho de Mendonça *et al.* (2013), uma DCN apresenta uma evolução dos FCMs, dentre outras propostas conhecidas na literatura (PAPAGEORGIU, 2014) para controle e sistema supervisório do processo do fermentador alcoólico proposto por Maher (1995), similar ao utilizado neste artigo. Neste trabalho, a DCN enviou *setpoints* para PIDs das válvulas do fermentador e implementou algumas funções de um sistema supervisório, como por exemplo a detecção de baixo nível de biomassa.

O trabalho de Wang *et al.* (2012), aplicou um controlador Fuzzy-PID para elevadores, com o objetivo de reduzir o grande consumo de energia, onde esse sistema de controle é necessário, pois o PI convencional não satisfaz eficientemente o controle de objetos não lineares.

O trabalho de conclusão de curso de Silva (2015), propôs um controle PID adaptativo sintonizado por técnicas computacionais inteligentes.

4 MAPAS COGNITIVOS FUZZY APLICADOS NA QUANTIFICAÇÃO DA MANUTENÇÃO

A necessidade de monitoramento da manutenção das máquinas agrícolas é primordial, como os equipamentos são automatizados esse controle se torna ainda mais complexo. Neste contexto, este presente artigo sugere utilizar o desenvolvimento do FCM para um *feedback* quantitativo.

A posteriori, um *Rule Base MultiLogic Fuzzy Cognitive Maps* RBMFCM, também inspirado nos mapas mentais de Axelrod (1976) e no FCM canônico do Kosko (Kosko, 1996) com regras e lógica multivariável e termos linguísticos deverão quantificar o nível de necessidade de manutenção da máquina e até mesmo de descarte da mesma quando por exemplo a necessidade de manutenção recorrentemente alta e a vida útil da mesma se encontra próximo ao definido pelo fabricante.

Maiores detalhes da construção de um FCM clássico, aplicado ao nível de satisfação discente, podem ser conferidos no trabalho (MENDONÇA *et al.*, 2017).

O FCM foi desenvolvido nessa pesquisa com base em dados reais de lançamentos/apontamentos de serviços de manutenção automotiva em Ordens de Serviço em sistema ERP, assim a saída desejada é um diagnóstico quantitativo por meio da opinião qualitativa dos especialistas, de outro modo o FCM é baseado em conhecimento, principalmente porque é um FCM relativamente pequeno e desenvolvido de forma qualitativa empregando termos linguísticos, como forte, fraco, muito fraco, entre outros.

Na década de 80, Luo, Wang e Zheng (2020), estudaram os mapas cognitivos conciliados aos aspectos de lógica Fuzzy e redes neurais artificiais. Várias aplicações de FCM surgiram na literatura em diversas áreas do conhecimento. Em especial, citam-se algumas das diversas, como por exemplo aplicações em vida artificial (ARRUDA *et al.*, 2018) e o trabalho de Felix *et al.* (2017) em sua revisão sobre os métodos e os softwares.

Redes cognitivas difusas (FRCNs) são redes neurais recorrentes (RNNs) destinadas a fins de classificação estruturada em que o problema é descrito por um conjunto explícito de recursos.

A vantagem desse sistema neural granular está em sua transparência

e simplicidade, ao mesmo tempo em que é competitivo em relação aos classificadores de última geração (CONCEPCION *et al.*, 2020).

O trabalho de Mendonça *et al.* (2017), utilizou duas versões de FCM para otimizar a trajetória de um robô utilizando técnicas de otimização, como por exemplo a técnica baseada em *Swarm Robotics* para otimizar a trajetória de um robô ou vários autônomos em FCM. Já o trabalho de Dikopoulou, Papageorgiou e Vanhoof (2020), objetivou aprender modelos de FCM a partir de dados sem qualquer conhecimento a priori. Este estudo de pesquisa utilizou-se de dados e métodos para o design automático de *Fuzzy Cognitive Maps (FCM)*, através de um grande conjunto de informações ordinal com base na eficiência e capacidades de modelos gráficos (DIKOPOULOU; PAPAGEORGIU; VANHOOF, 2020).

Outro trabalho da área de aprendizagem é o trabalho de Guoliang Feng e colaboradores (2020), consideram numerosos métodos de aprendizagem para processos com *Fuzzy Cognitive Maps (FCMs)*, como os métodos de aprendizagem baseados em Hebbian e baseados na população. Foram desenvolvidos para modelagem e simulação de sistemas dinâmicos. No entanto, esses métodos são confrontados com várias limitações com número excessivo de conceitos.

Em sistemas de médio e grande porte pode ser sim uma dificuldade. Uma área de vanguarda na robótica, onde dois trabalhos do autor utilizaram duas diferentes técnicas de *Swarm Robotics* para resgate de vítimas em uma catástrofe (MENDONÇA *et al.*, 2020) entre outras diversas aplicações.

Já para a área específica de manutenção, Jamshidi *et al.* (2015), apresentaram a aplicação de uma FCM para a avaliação de riscos da terceirização da manutenção, como uma ferramenta de suporte para decisão da terceirização da manutenção, considerando as inter-relações entre os fatores de riscos (como cronograma, qualidade, flexibilidade, entre outros) e suas consequências.

Além das áreas de conhecimento, surgiram evoluções do FCM, como por exemplo: em robótica móvel autônoma e controle de processos, respectivamente ED-FCM (*EventDriven-Fuzzy Cognitive Maps*) e DCN (*Dynamic Cognitive Networks*). No trabalho de Acampora e Loia (2009), a Inteligência Ambiente nasceu como um computador paradigma que lida com

um novo mundo onde os dispositivos de computação são empregados a fim de tornar mais ampla a interação entre seres humanos e tecnologia da informação, montando um ecossistema computacional dinâmico capaz de satisfazer os requisitos dos usuários.

Em um FCM clássico o conhecimento explícito é representado através das atribuições de valores, conceitos e relações causais, e o conhecimento implícito é representado através da estrutura do mapa. No entanto, permanece a dificuldade de transformar o conhecimento em modelos de comportamento humano.

Na construção dos mapas conceituais esta dificuldade se reflete principalmente na definição da semântica e do relacionamento entre os conceitos (MENDONÇA *et al.*, 2015).

Além desta dificuldade de construção, a aquisição de dados deve ser bastante criteriosa, no sentido de se transformar dados em informação consistente para o mapa cognitivo para que o mesmo seja finalmente validado com dados reais ou sintéticos obtidos por meio de simulações.

De um modo geral, pode-se definir que o FCM combina aspectos das Redes Neurais Artificiais, Lógica Fuzzy, Redes Semânticas, entre outras técnicas clássicas computacionais inteligentes (PAPAGEORGIU, 2014). De modo específico, pode-se conceitualizar que o FCM é uma metodologia de causalidade baseada no conhecimento para modelar sistemas complexos de decisão. Nesse contexto, um FCM descreve o comportamento de um sistema desconhecido em termos de conceitos, cada conceito representa uma entidade, um estado, uma variável ou uma característica do sistema (ACAMPORA; LOIA, 2009).

Geralmente, existem dois tipos de FCM, FCMs manuais e FCMs automatizados (YESIL *et al.*, 2013). FCMs manuais são produzidos por especialistas manualmente, metodologia de desenvolvimento aplicada nessa pesquisa e FCMs automatizados produzidos por dados históricos, por exemplo. Além disso, existem diferentes tipos de funções de ajuste utilizando a evolução dos valores dos conceitos dos FCMs (inferência FCM) (FELIX *et al.*, 2017).

Nesta pesquisa, a inferência FCM é caracterizada por uma função sigmoide unipolar, onde o parâmetro λ é o fator de esquecimento com range

de 0,1 a 1, valor 1 foi utilizado nesse trabalho (Equação 3), estabelecendo um fator de memória na evolução numérica dos conceitos de um Mapa Cognitivo Fuzzy.

Desse modo, esses valores vão ser atualizados através da iteração com os outros conceitos e com o seu próprio valor, vão evoluindo após várias iterações, como mostra a função da equação (2) em (3) até estabilizarem-se num ponto fixo ou num ciclo limite (MENDONÇA *et al.*, 2013).

$$(2) \quad A_i = f \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i \\ n}} (A_j \times W_{ij}) \right)$$

Onde:

k é o contador das iterações, n é o número de nós no grafo, λ é fator de esquecimento, foi empregado com valor *default* 1.

W_{ji} é o peso do arco que conecta o conceito C_j ao conceito C_i , A_i (A_i anterior) é o valor do conceito C_i na iteração atual (anterior) e a função f (Equação 3) é uma função do tipo sigmoide:

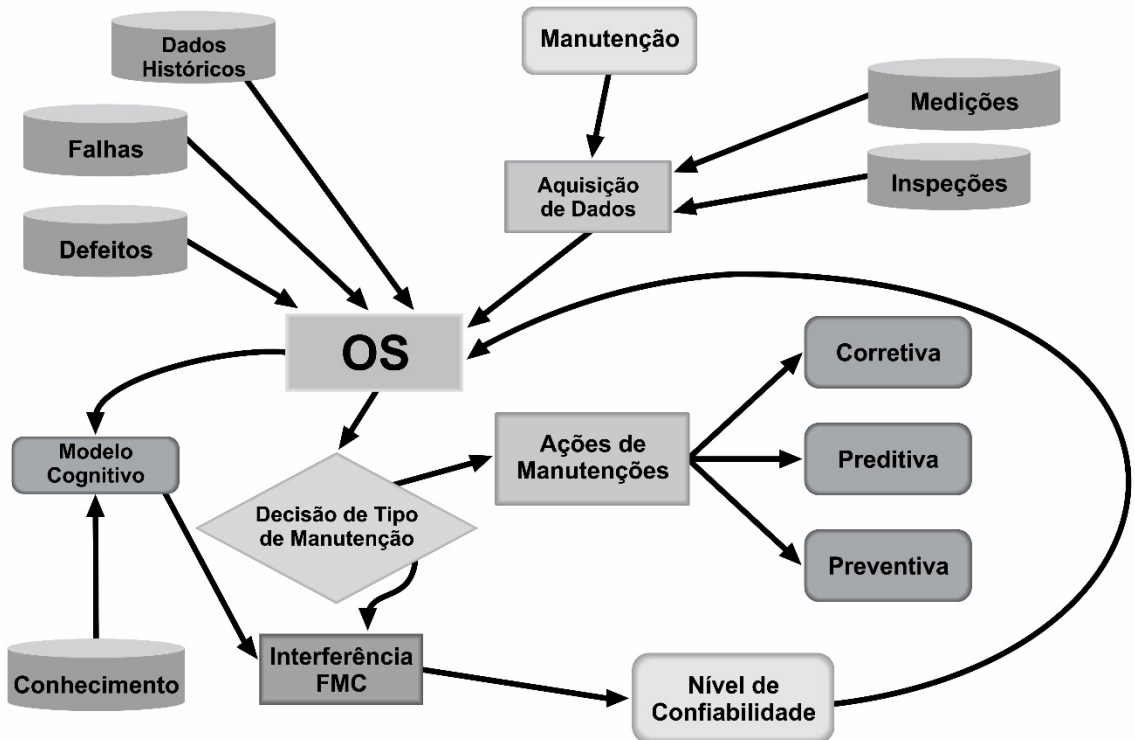
$$(3) \quad f(x) = \frac{1}{(1 + e^{-\lambda x})}$$

Em alguns casos, o FCM clássico pode não estabilizar e oscilar, ou até mesmo apresentar um comportamento caótico. Geralmente, para sistemas bem-comportados, se observa que após um número finito de iterações, os valores dos conceitos atingem um ponto de equilíbrio fixo ou um ciclo limite, mínima variação em torno de um valor fixo. O qual pode ser observado na Figura 10, após praticamente 5 iterações em que os valores finais dos conceitos previamente modelados ficam fixos ou praticamente fixos. Neste contexto, podem-se citar trabalhos que investigam a estabilidade dos FCMs.

A Figura 9 mostra a sequência de desenvolvimento lógico do método proposto. Observa-se que após a inferência do FCM, esta influência na

tomada de decisão realizada pela máquina de estados, devido ao nível de confiabilidade encontrado pelo FCM retornar a Abertura de OS, Quadro 1. Ainda de acordo com a Figura 8, o processamento do item *checklist* determina as ações a serem executadas de acordo com as entradas de informações da manutenção.

Figura 9 - Fluxograma do funcionamento da sD-FCM aplicado a MCC



Fonte: Mendonça (2020)

O FCM inicial também considera as entradas de forma binária, alta e baixa, como por exemplo, a qualificação dos profissionais da manutenção será considerada alta ou baixa. Porém, futuros trabalhos poderão endereçar uma discretização mais específica como, por exemplo, pequena, média e alta. De modo similar o desenvolvimento dos conceitos referentes à ocorrência de falhas e defeitos que, em cada política de gerenciamento deverá considerar alta e baixa.

Esse item deverá considerar o nível de confiabilidade atual da máquina (por meio da inferência do FCM).

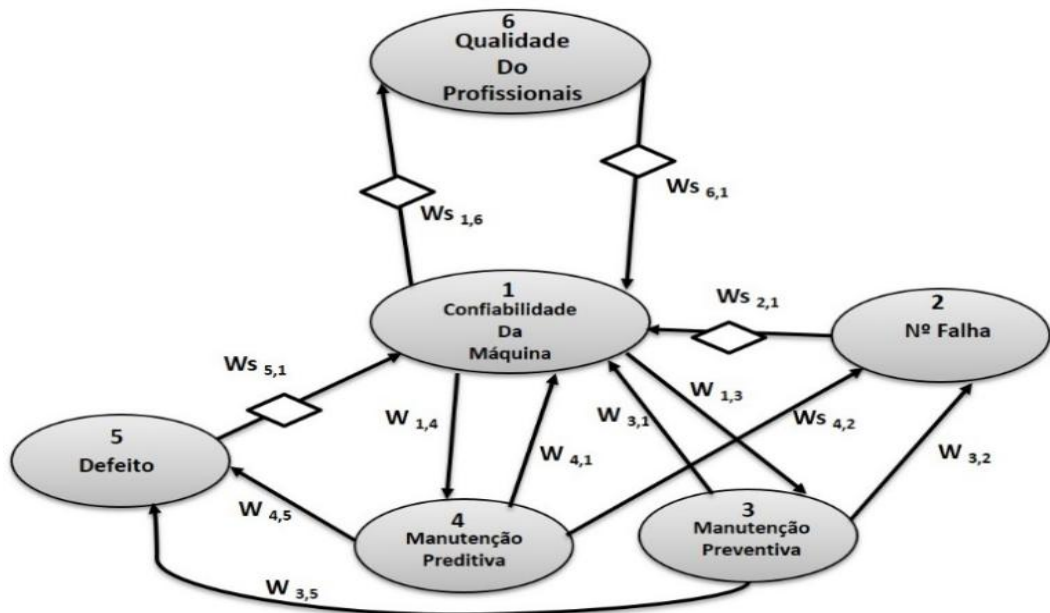
Observa-se que a proposta desse trabalho é um *Dynamic-FCM* simplificado, do inglês *simplified Dynamic-FCM* (sD-FCM, sigla convencional na sequência do trabalho).

O sD-FCM altera sua estrutura de acordo com a mudança dos conceitos de entrada. No exemplo citado, a má qualificação da equipe de manutenção pode ter uma influência negativa alta na confiabilidade da manutenção, enquanto de forma inversa poderá ter uma influência positiva alta. Ressalta-se que todo o formalismo matemático para a inferência e estabilidade do FCM clássico são aplicados nessa proposta, isso se deve

porque o sD-FCM funciona como FCM clássico quando ocorre alguma modificação na sua estrutura.

O modelo cognitivo clássico só contém relações causais ($W_{in, n}$) e seus devidos conceitos (1 até 6), como mostra a Figura 10. Devido a necessidade de se binarizar as entradas dos conceitos 2, 3 e 6 o modelo proposto teve a inclusão de relações de seleção ($W_{sn, n}$). Essas relações de seleção alteram o valor de seus referentes pesos através de regras do tipo SE-ENTÃO, alterando assim a intensidade (ou a importância) de alguns conceitos inferidos na saída do sD-FCM.

Figura 10 - sD-FCM aplicado a MCC



Fonte: Mendonça (2020)

A Tabela 1 mostra o pseudocódigo gerado a partir do algoritmo elaborado e desenvolvido no software MATLAB® através da simulação dos dados e informações apresentados nesse trabalho, sendo o sD-FCM aplicado na MCC inspirado em FCM.

Tabela 1 - Pseudocódigo sD-FCM aplicado a MCC

Start

Initialize Environment:

Clear all variables

Clear console

Close all figures

Initialize Variables:

$$c1(1) = 0$$

$$c2(1) = 0$$

$$c3(1) = 0.8$$

$$c4(1) = 0.8$$

$$c5(1) = 0$$

$$c6(1) = 0$$

For k from 2 to 10:

Calculate x using c2(k-1), c3(k-1), c4(k-1), c5(k-1), c6(k-1)

Compute c1(k) using activation function with x

Calculate x using c3(k-1) and c4(k-1)

Compute c2(k) using activation function with x

Assign c3(k) = c3(k-1)

Assign c4(k) = c4(k-1)

Calculate x using c3(k-1) and c4(k-1)

Compute c5(k) using activation function with x

Calculate x using c1(k-1)

Compute c6(k) using activation function with x

End For

Plot c1 against a title 'C1 – Confiabilidade'

Plot c2 against a title 'C2 – Falhas'

Plot c3 against a title 'C3 – Preventiva'

Plot c4 against a title 'C4 – Preditiva'

Plot c6 against a title 'C6 – Qualificação dos Profissionais'

Plot c5 against a title 'C5 – Defeitos'

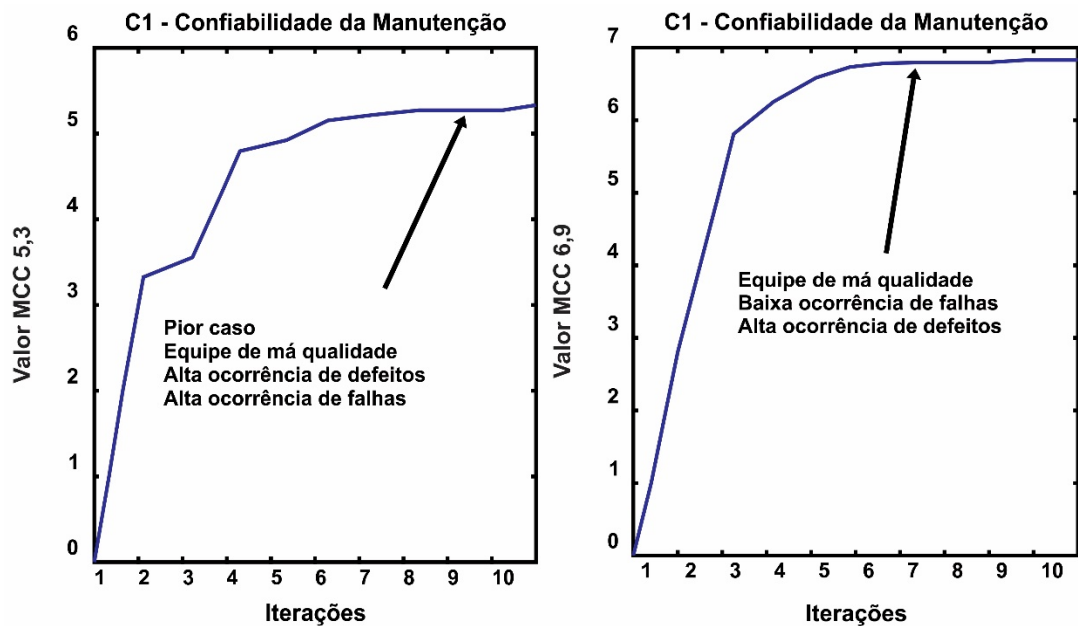
End

Fonte: Autor (2023)

Esse ajuste dinâmico dos pesos possibilita uma melhor adaptação do modelo para abordar diferentes possibilidades de análises, como por exemplo, com a equipe mal qualificada, alta ocorrência de defeitos e baixa ocorrência de falhas. Não é escopo desse trabalho apresentar o desenvolvimento do D-FCM, Figura 11.

Alguns resultados iniciais podem ser conferidos na Figura 11, em diferentes situações.

Figura 11 - Resultados iniciais sD-FCM - Simulação 1 e 2



Fonte: Autor (2023)

Entretanto, maiores detalhes da construção da versão completa do DFCM e da DCN (*Dynamic Cognitive Networks*), ferramentas que inspiraram o desenvolvimento proposto, pode ser conferido no trabalho (NÁPOLES *et al.*, 2016).

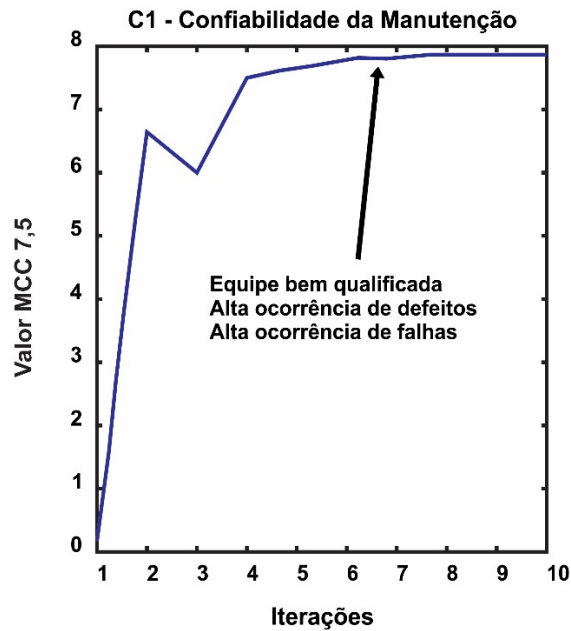
Os resultados iniciais sugerem que o D-FCM simplificado ou sD-FCM atribuiu valores em forma crescente; desde o pior caso com a equipe mal qualificada e alta ocorrência de falhas e defeitos com um valor inicial de 5.3 para MCC; até o melhor caso com baixa ocorrência de falhas e defeitos e

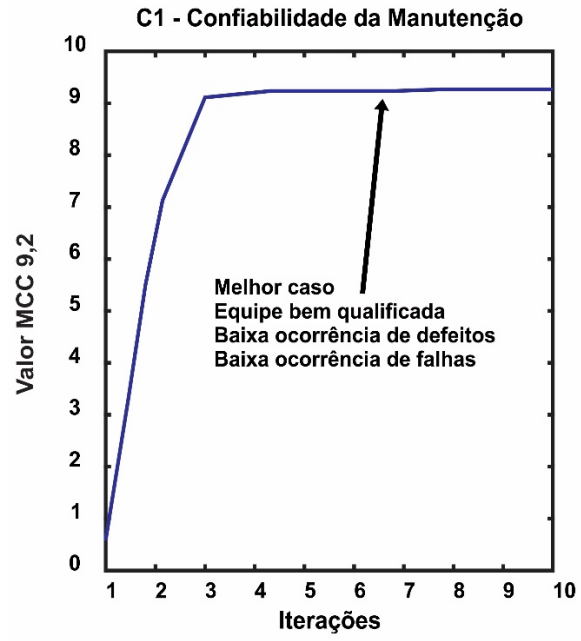
equipe bem qualificada ou com alta qualificação com valor de 9.2

Um detalhe importante dessa área é sair do estado de crença, o qual foi apresentado e validar o mesmo. Na próxima seção será abordada uma possível solução para essa etapa final de uma ferramenta da área de *softcomputing*, em especial sD-FCM. Observa-se que a partir da iteração 7 o FCM atingiu ciclo limite (ARRUDA *et al.*, 2018).

Já a Figura 12 mostra outras duas situações encontradas pela ferramenta proposta, nessa figura os ciclos limites foram 6 para o primeiro caso e 3 para o segundo. As situações foram descritas no corpo delas.

Figura 12 - Resultados iniciais sD-FCM - Simulação 3 e 4





Fonte: Autor (2023)

5 FUNDAMENTOS E DEFINIÇÕES DA NECESSIDADE DE MANUTENÇÃO DE ACORDO COM RBMFCM

A colhedora de cana, como mostra a Figura 13, hoje é o principal equipamento atuando no campo na atividade de colheita, ela realiza em média a colheita de 700 ton/dia, ela é composta basicamente por um sistema hidráulico acionado por um motor a diesel acima de 350 cv de potência e movida por material rodante, o conhecimento de seu comportamento mecânico relacionado a manutenção é de fundamental importância, os históricos gerados por intervenções podem alimentar árvores de decisões as quais subsidiará redes neurais para tomada de decisões.

Normalmente as máquinas agrícolas na manutenção automotiva são divididas em sistemas com o objetivo de facilitar o reconhecimento de suas funções e componentes.

Figura 13 - Colhedora de cana-de-açúcar no campo



Fonte: Autor (2023)

Para efeito de desenvolvimento deste estudo, a colhedora foi dividida de forma objetiva em três sistemas, a saber: Sistema hidráulico; Sistema mecânico (motor, estrutura e material rodante); Sistema elétrico entre outros.

As empresas agrícolas do setor canavieiro utilizam módulos de manutenção em seus sistemas ERP para registrar informações sobre as manutenções automotivas em suas frotas.

Isso permite a geração de indicadores e outros dados necessários para identificar os equipamentos com recorrência de problemas, usando por exemplo árvores de decisão (ABDELHALIM; TRAORE, 2009).

Para que se obtenha êxito nesses estudos, é de fundamental importância que a empresa tenha uma equipe de PCM – Planejamento e Controle de Manutenção bem estruturada, e que as Ordens de Serviços e demais informações lançadas no sistema sejam confiáveis e padronizadas, pois elas subsidiaram as análises realizadas. Toda busca será feita diretamente no banco de dados transacional, do sistema de gestão de informações adotado pelo setor de manutenção automotiva.

O sistema possui milhares de registros com as informações relativas aos diversos equipamentos que passam por processos de manutenção diariamente.

5.1 Lógica multivalorada

Lógica multivalorada, precursora da lógica Fuzzy, é um sistema que permite mais valores além do binário padrão de verdadeiro ou falso (0 ou 1). A lógica multivalorada possui uma gama maior de valores possíveis, permitindo uma flexibilidade maior na tomada de decisões e no processamento de informações (COSTA; SILVA, 2018).

Costa e Silva (2018), explicam que a lógica multivalorada, na prática, pode ser vista como um conjunto de valores contínuos entre 0 e 1. Assim, ao contrário da lógica binária, que só permite estados de "verdadeiro" ou "falso", a lógica multivalorada permite estados intermediários de verdade.

Segundo Klir e Yuan (1995), a lógica multivalorada é especialmente útil quando se lida com incertezas. Em muitos casos, informações incompletas ou incertas não podem ser adequadamente representadas usando apenas a lógica binária. A lógica multivalorada, por outro lado, permite uma representação mais adequada e precisa dessas incertezas.

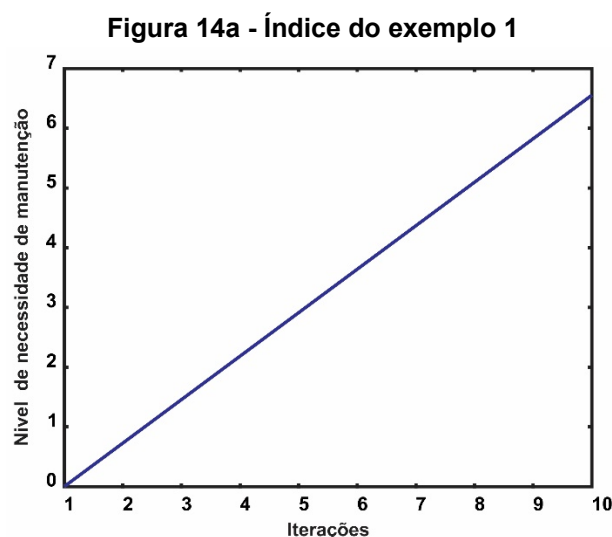
5.2 Lógica multivalorada aplicados na quantificação da manutenção de colhedoras de cana-de-açúcar

Este texto discute os parâmetros usados para prever a necessidade de manutenção em máquinas agrícolas, especificamente colhedoras de cana. As variáveis consideradas incluem o tempo de operação da máquina, a área onde os problemas surgem, o local de manutenção (em campo ou oficina), o tipo de manutenção (corretiva, emergencial ou preventiva), se o problema é recorrente e o tempo de vida útil da máquina.

Em uma abordagem mais específica, quatro variáveis principais foram identificadas: o tipo de manutenção e sua respectiva importância, o tipo de equipamento (neste caso, a colhedora), a recorrência da manutenção (quantificada como pouco, médio ou muito), e a duração da manutenção em relação ao tempo de vida útil previsto pela máquina. Estes parâmetros são determinados por especialistas, de maneira similar à lógica Fuzzy.

O texto menciona a aplicação desses princípios em dois exemplos, embora de maneira simplista. Nesse primeiro caso foram considerados índices normalizados de 0 a 1 com a seguinte situação

Manutenção preditiva peso 0,4; tipo de máquina colheitadeira peso 0,8; manutenção teve índice considerável de recorrência 0,7; e uma duração de manutenção não muito expressiva 0,4, e a vida útil quantificada em 0,5. O índice inicialmente estimado foi de acordo com a Figura 14a.

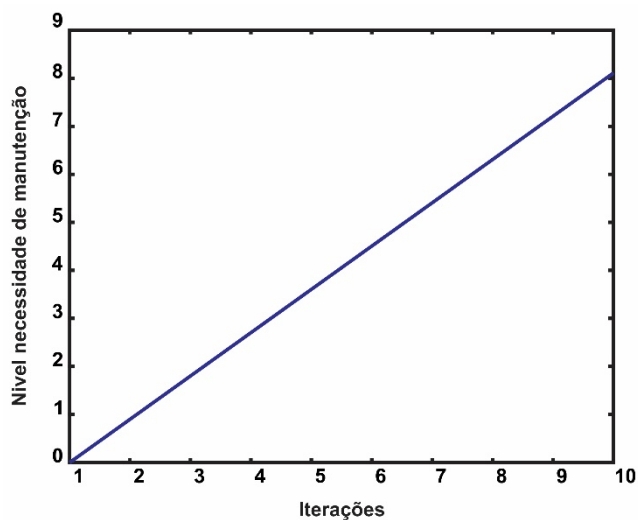


Fonte: Autor (2023)

Já na Figura 14b, exemplo 2, considera níveis mais altos para os parâmetros analisados, todos os mesmos parâmetros com valores de 0,8 (a priori, uma condição desfavorável que sugere que a máquina deve em breve passar por uma manutenção preditiva baseada na confiabilidade).

O índice inicialmente estimado foi de acordo com a Figura 14b. A priori, pode-se estimar que um índice acima de 7 já sugere manutenção RCM na máquina, o valor do índice também pode ser relacionado com o tempo estimado para execução de manutenção dela. Além disso, a validação do sistema proposta, inicialmente no estado de crenças, o qual na prática só pode ser validado com a aplicação do mesmo para tomadas de decisões assertivas.

Figura 14b - Índice do exemplo 2



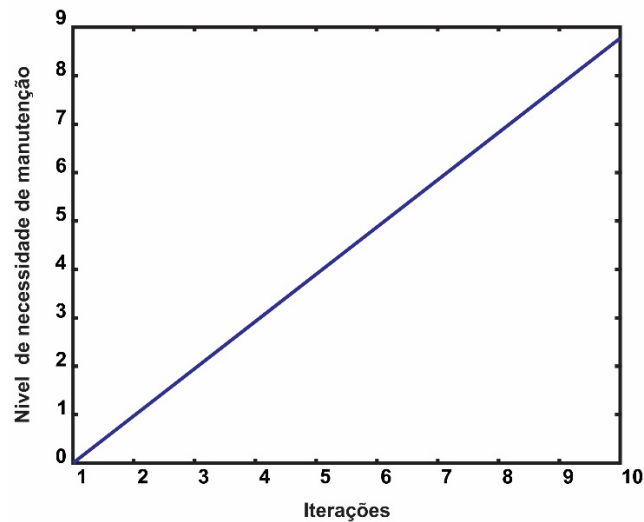
Fonte: Autor (2023)

Outro experimento também a vida útil da máquina ou equipamento recomendado pelo fabricante no limite, com os outros itens similares experimentos anteriores que poderá influenciar na necessidade de manutenção ou até mesmo em uma situação mais drástica na substituição da mesma.

Na Figura 15a, exemplo 3, com a máquina no final da sua vida útil recomendada teve um nível ainda maior que no exemplo com as variáveis mais amenas, ou seja, a priori com nível próximo de nove o gerente de

manutenção terá uma ferramenta que sugere substituição da mesma ou manutenção urgente.

Figura 15a - Índice do exemplo 3



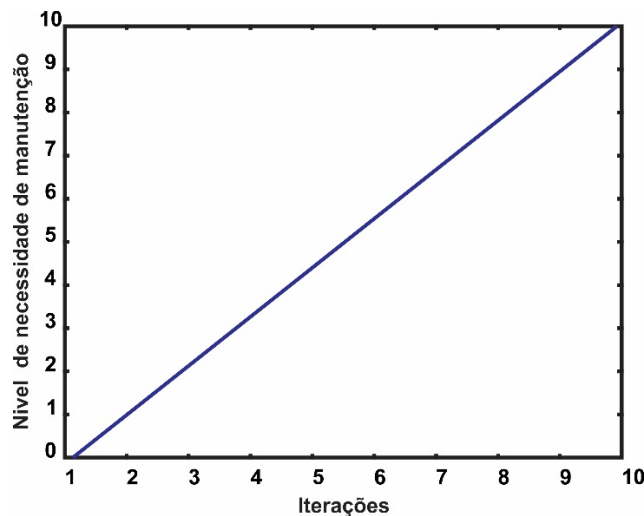
Fonte: Autor (2023)

A ferramenta utilizada supracitada foi inspirada em trabalhos precursores e utilizada lógica multivalorada, abordada nesse capítulo, *Fuzzy Cognitive Maps* e regras inspirada em uma extensão da versão clássica ou canônica de Kosko (1986), a Rule-Base FCM de Carvalho e Thomé (2000).

Na Figura 15b, exemplo 4, já mostra nível 10, nesse nível já sugere no mínimo uma manutenção urgente ou até substituição do equipamento.

Essa será a figura com a inclusão de uma tabela explicativa do *Rule Base MultiLogic Fuzzy Cognitive Maps RBMFCM*.

Figura 15b - Índice do exemplo 4

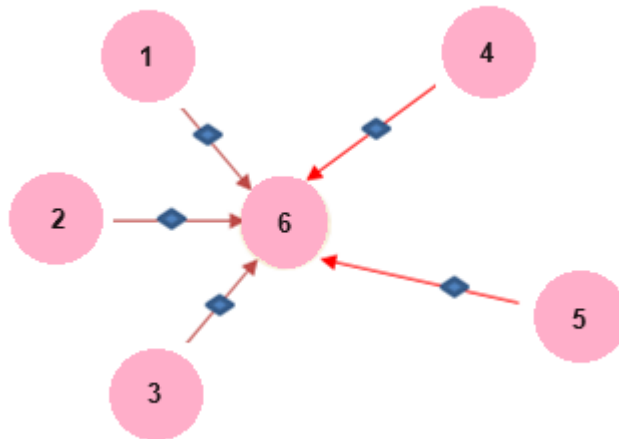


Fonte: Autor (2023)

A Figura 16, foi elaborada de acordo com os cinco principais fatores

que influenciam diretamente na disponibilidade mecânica e confiabilidade da manutenção, onde para cada fator determinou-se um peso, como já informado anteriormente neste trabalho.

Figura 16 - Grafo da viabilidade de implantação por meio do RBMLFCM



Fonte: Autor (2023)

Nesse grafo valores são colocados em cada uma das entradas, círculos e suas respectivas ligações (arcos), relações de causa e efeito. E, de acordo com alguma condição representada pelos losangos eles podem ser alterados, como mostra a Equação 4.

$$C_j = i = \sum_i^j C_j \times peso_{ij}$$

(4)

Onde,

C_j - Conceito do grafo

Somatória ponderada entre os pesos, $peso_{ij}$ (conectam os seus respectivos conceitos) definidos pelos especialistas, de acordo com a tomada de decisão. Ressalta que são oito conceitos, um central que quantifica os resultados e os demais de causa e efeito.

A Tabela 2 mostra o pseudocódigo gerado a partir do algoritmo elaborado e desenvolvido no software MATLAB® através da simulação dos

dados e informações apresentados nesse trabalho, sendo o RBMLFCM aplicado na MCC e uma extensão do FCM.

Tabela 2 - Pseudocódigo RBMLFCM aplicado a MCC

Initialize variables:

$c1 = 0.8$

$c2 = 0.8$

$c3 = 0.8$

$c4 = 0.8$

$c5 = 0.8$

$c6 = 1$

... Initialize all the other c variables ...

$k = 1$

Start loop for k from 2 to 10:

IF c3 is greater than or equal to 0.5 THEN

Increase c53 by 0.49445

ELSE

Increase c53 by 0.02

END IF

IF c4 is greater than or equal to 0.5 THEN

Decrease c54 by 0.3

ELSE

Decrease c54 by 0.01

END IF

IF c2 is greater than or equal to 0.5 THEN

Increase c52 by 0.5

ELSE

Increase c52 by 0.02

END IF

IF c1 is greater than or equal to 0.5 THEN

Increase c51 by 0.5

ELSE

Increase c51 by 0.02

END IF

IF c6 is greater than or equal to 0.5 THEN

Increase c55 by 0.05

ELSE

Decrease c55 by 0.02

END IF

IF c6 is greater than or equal to 1 THEN

Decrease c55 by 0.1

ELSE

Decrease c55 by 0.02

END IF

... Other similar IF-ELSE statements for c7, c8, and c9 ...

c5f = sum of c51, c52, c53, c54, c55, c57, c58, c59

End of loop

Plot c5f against the range of k (from 2 to 10)

Fonte: Autor (2023)

6 CONCLUSÕES FINAIS

Os resultados iniciais, baseados em experimentos simulados e alinhados com a intenção de aplicação prática, mostraram-se promissores. A abordagem da Manutenção Centrada na Confiabilidade validou que a manutenção fundamentada em algoritmos pode reforçar a confiabilidade mecânica, especialmente em colhedoras.

O Mapa Cognitivo Fuzzy Dinâmico Simplificado (sD-FCM) provou ser uma ferramenta eficaz na gestão de manutenção. Sua relevância se destaca, principalmente, na avaliação macro da eficácia da manutenção, identificação de falhas recorrentes em equipamentos e no entendimento da dinâmica da equipe de manutenção. O progresso observado nos resultados aponta para uma transição do cenário inicial menos favorável para um cenário otimizado.

O estudo inicial destacou a crucialidade tanto da qualificação da equipe quanto da confiabilidade das informações no sistema ERP. Identificou-se uma relação intrincada entre incidentes, falhas e o nível de qualificação da equipe, sendo este último fator de especial relevância.

Ao focar na análise de colhedoras de cana com base nos dados da Usina São Francisco, a eficácia do RBMFCM foi evidenciada. A lógica multivalorada revelou-se ideal para lidar com incertezas, principalmente quando comparada à lógica binária, que se mostrou insuficiente para representar dados incertos ou incompletos do setor de manutenção automotiva agrícola.

A vantagem da lógica multivalorada reside na sua flexibilidade, permitindo uma decisão mais informada e um processamento de dados mais robusto. Isso ficou evidenciado através da análise conduzida por um especialista.

A expectativa é que este estudo tenha dado uma contribuição relevante ao introduzir uma ferramenta computacional na gestão de manutenção de colhedoras de cana, proporcionando diagnósticos quantitativos. Em trabalhos futuros, busca-se aprofundar a análise em sistemas específicos (como hidráulico, elétrico e mecânico) e criar uma interface que facilite a tomada de decisões.

Poderá ser objeto de estudos futuros o foco em refinar a metodologia,

combinando-a com a previsão de paradas e validando-a em estudos de caso reais, utilizando gráficos e planilhas, podendo alimentar o *Power BI* da empresa. Por fim, a análise de dados históricos pode fornecer uma nova ferramenta para aprimorar a tomada de decisões gerenciais, validando a metodologia apresentada em situações práticas e colaborando para a evolução da gestão de manutenção na atenuação de manutenções, em especial corretivas emergenciais.

REFERÊNCIAS

- ACAMPORA, G.; LOIA, V. A dynamical cognitive multi-agent system for enhancing ambient intelligence scenarios. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS*, 18., 2009, Jeju, Coreia. IEEE, 2009. p. 770-777.
- ABDELHALIM, A.; TRAORE, I. Converting declarative rules into decision trees. *In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE*, 2009, San Francisco. Hong Kong: IAENG, 2009. Disponível em: https://www.iaeng.org/publication/WCECS2009/WCECS2009_pp206-212.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.
- ALGHATHBAR, K.; WIJESEKERA, D. Analyzing information flow control policies in requirements engineering. *In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON POLICIES FOR DISTRIBUTED SYSTEMS AND NETWORKS*, 5, 2004, York Town Heights, NY, EUA. IEEE, 2004. p. 193-196.
- AL-NAJJAR, B.; ALSYOUF, I.; Selecting the most efficient maintenance approach using Fuzzy multiple criteria decision making. **International Journal of Production Economics**, v. 84, n. 1, p. 85-100, 2003.
- ALSYOUF, I. Maintenance practices in Swedish industries: Survey results. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n. 1, p. 212-223, set. 2009.
- ARRUDA, L. V. R. *et al.* Artificial Life Environment Modeled by Dynamic Fuzzy Cognitive Maps. **IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems**, v. 10, n. 1, p. 88-101, 2018.
- BARBALHO, A. Aumentar a produtividade é a chave. **Tribuna do Norte**, 24 nov. 2016. Disponível em: <http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/aumentar-a-produtividade-a-a-chave/364451>. Acesso em: 09 out. 2021.
- BARBOSA, L. F. **Eficiência da manutenção agrícola: um estudo de caso**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2015.
- BENINI, L.; SANTOS, A. Utilização da manutenção centrada em confiabilidade (MCC) em embaladora à vácuo de alimentos. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa, v. 7, n. 2, p. 1-14, 2021.
- BRANCO FILHO, G. **A organização, o planejamento e o controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.
- CAIADO, R.; GOYANNES, G. **Contribuições da manutenção centrada em confiabilidade no setor de instrumentação de uma indústria do**

segmento de petróleo. 2011. Projeto Final (Curso de Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal Fluminense, 2011.

- CARVALHO, J. P.; TOMÉ, J. A. B. Rule based fuzzy cognitive maps – A Comparison With Fuzzy Cognitive Maps. *In: PROCEEDINGS INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE NORTH AMERICAN FUZZY INFORMATION PROCESSING SOCIETY*, 19., 2000, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2000.
- CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. de. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando promethee II em situações de incerteza. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 279-296, maio/ago. 2005.
- CONCEPCION, L. *et al.* Fuzzy-Rough Cognitive Networks: Theoretical Analysis and Simpler Models. **IEEE Transactions on Cybernetics**, v. 52, n. 5, p. 2994-3005, 2020.
- COSTA, W. V. **O uso da lógica Fuzzy como ferramenta de processo decisório para o aumento da confiabilidade no processo de manutenção dos filtros de celulose da redução**. 2007. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2007.
- DEGHANIAN, P. *et al.* Critical Component Identification in Reliability Centered Asset Management of Power Distribution Systems Via Fuzzy AHP. **IEEE Systems Journal**, v. 6, n. 4, p. 593-602, 2012.
- DIKOPOULOU, Z.; PAPAGEORGIOU, E. I.; VANHOOF, K. **Retrieving sparser Fuzzy cognitive maps directly from categorical ordinal dataset using the graphical lasso models and the MAX-threshold algorithm**. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, v. 2020- July 2020.
- DING, S. H.; KAMARUDDIN, S. Assessment of distance-based multi-attribute group decision-making methods from a maintenance strategy perspective. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 11, issue 1, p. 73-85, 2015.
- DOEBLING, S. W. Minimum-Rank Optimal Update of Elemental Stiffness Parameters for Structural Damage Identification. **AIAA Journal**, v. 34, n. 12, p. 2615-2621, 1996.
- FELIX, G. *et al.* A review on methods and software for Fuzzy cognitive maps. **Artificial Intelligence Review**, v. 52, n. 3, p. 1707-1737, 2017.
- FERNANDES, D. R. Uma contribuição sobre a construção de indicadores e sua importância para a gestão empresarial. **Revista da FAE**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 1-18, 2004.
- FERNANDES, R. T. **Supervisão de um sistema híbrido eólico/diesel usando lógica Fuzzy**. 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2005.

FERREIRA, C. **Estudo Comparativo entre as Técnicas de Controle Fuzzy, PI e Adaptativo Aplicado ao Processo de Fabricação de Papel Reciclado Utilizando a Ferramenta Delta Tune**. 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

FISCHMANN, A.; ZILBER, M. A. Utilização de indicadores de desempenho como instrumento de suporte à gestão estratégica. *In: ENCONTRO DA ANPAD, XXIII.*, 1999, Foz do Iguaçu. Rio de Janeiro: ANPAD, 1999.

FINGUERUT, J. Cana-de-açúcar e a Usina do Futuro: Uma Perspectiva de Risco de Investimentos. **Boletim Energético - FGV Energia**, Ribeirão Preto, ago. 2019. (Caderno Opinião).

FLEMING, P. V.; SILVA, F. F.; FRANÇA, S. R. R. O. Aplicando manutenção centrada em confiabilidade (MCC) em indústrias brasileiras: lições aprendidas. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 1999, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: ABEPRO, 1999.

JAMSHIDI, A. *et al.* Dynamic risk modeling and assessing in maintenance outsourcing with FCM. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND SYSTEMS MANAGEMENT*, 2015, Seville, Spain. IEEE, 2015. p. 209-217.

JANIER, J. B.; ZAHARIA, M. F. Z. Condition Monitoring System for Induction Motor Using Fuzzy Logic Tool. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATICS AND COMPUTATIONAL INTELLIGENCE*, 1. 2011, Bandung, Indonesia. IEEE, 2011.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção** Função Estratégica. 2.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção**: função estratégica. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção**: função estratégica. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009.

KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic**: Theory and Applications. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995.

KOSKO, B. Fuzzy cognitive maps. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. 24, n. 1, p. 65-75, 1986.

LIANG, H.; SUN, F. Offshore mechanical maintenance based on Fuzzy condition assessment and RCM analysis. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND CONTROL ENGINEERING*, 2011, Yichang, China. IEEE, 2011. p. 5354-5357. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6058357/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

LIMA, F.; SERRA, G. (2015). Fuzzy PID controller multi objective genetic design.

In: CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 10., 2015, Auckland, New Zealand. IEEE, 2015. p. 1506-1511.

LUCATELLI, M. V. **Proposta de aplicação de manutenção centrada em confiabilidade em equipamentos médico-hospitalares**. 2002. 272 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

LUO, C.; WANG, H.; ZHENG, Y. Controllability of k-Valued Fuzzy Cognitive Maps. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 28, n. 8, p. 1694-1707, 2020.

MANHÃES, C. M. C. **Avaliação do desempenho de colhedoras de cana-de-açúcar na região norte fluminense**. 2014. 116 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.

MARÇAL, R. F. M. **Um método para detectar falhas incipientes em Máquinas Rotativas baseado em Análise de Vibrações e Lógica Fuzzy**. 2000. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

MAHER, M. **Modélisation elaboration estimation et de commander: application à um bioprocédé**. 1995. Tese - Université Paul Sabatier, LAAS/CNRS, Toulouse, 1995.

MENDES, A. A.; RIBEIRO, J. L. D. Estabelecimento de um plano de manutenção baseado em análises quantitativas no contexto da MCC em um cenário de produção JIT. **Production**, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 675-686, jul./set. 2014.

MENDONÇA, M. *et al.* A cooperative architecture for swarm robotic based on dynamic Fuzzy cognitive maps. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 59, p. 122-132, 2017.

MENDONÇA, M. *et al.* A Subsumption Architecture to Develop Dynamic Cognitive Network-Based Models with Autonomous Navigation Application. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 24, n. 1, p. 117-128, 2013.

MENDONÇA, M. *et al.* Fuzzy Cognitive Maps Applied to Student Satisfaction Level in a University. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 12, p. 3922-3927, 2015.

MENDONÇA, M. *et al.* Multi-robot exploration using Dynamic Fuzzy Cognitive Maps and Ant Colony Optimization. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS, 2020, Glasgow, UK. IEEE, 2020. p. 1-8.

MENDONÇA, M. *et al.* Semi-Unknown Environments Exploration Inspired by Swarm Robotics using Fuzzy Cognitive Maps. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS*, 2019, New Orleans, USA. IEEE, 2019. p. 1-8.

MENDONÇA, M.; CHUN, I. R.; ROCHA, M. E. C. Dynamic Fuzzy cognitive maps applied in realibility centered maintenance of electric motors. **IEEE Latin America Transactions**, v. 15, n. 5, p. 827-834, 2017.

MODARRES, M. K., M.; KRIVSTOV, V. **Reliability Engineering and Risk Analysis**. New York: Marcel Dekker, 1999.

MONCHY, F. **A Função Manutenção**: Formação para a gerência da Manutenção Industrial. São Paulo: Durban, 1987.

MOSALLAM, A. *et al.* Nonlinear Relation Mining for Maintenance Prediction. *In: AEROSPACE CONFERENCE*, 2011, Big Sky, MT, USA. IEEE, 2011. p. 1-9.

MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Tradução de Kleber Siqueira. Lutterworth, Inglaterra: Aladon, 2000.

NÁPOLES, G. *et al.* On the convergence of sigmoid Fuzzy Cognitive Maps. **Information Sciences**, v. 349, p. 154-171, 2016.

OLIVEIRA, J. C.F. **Análise de indicadores de qualidade e produtividade da manutenção nas indústrias brasileiras**. GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas (e-ISSN: 1984-2430). Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista, UNESP, Bauru, 2013.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**. v. 4, n. 2, p. 1-16, 2008.

PAOLETTI, G. J.; HERMAN, G. Monitoring of electrical equipment failure indicators and zero-planned outages: Past, present, and future maintenance practices. *In: PULP AND PAPER INDUSTRY CONFERENCE*, 61., 2015, Milwaukee, WI, USA. IEEE, 2015. p. 5-14.

PAPAGEORGIU, E. I. (Ed.). **Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. v. 54.

PEREIRA, D. H.; GROTTTO, C. G. L. Produção e análises de combustíveis sólidos alternativos obtidos a partir de resíduos agroindustriais. **Desafios - Revista Interdisciplinar Da Universidade Federal Do Tocantins**, Palmas, v. 5, n. espec., p. 196-203, 2018.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. **Manutenção: função estratégica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

RAFULL, Z. L.; SOUZA, C. M. A. Desafios reais. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v. 5, p. 8-11, 2006.

RAN, F. A., Hsu, P. D., Lin, C. Y., Gootenberg, J. S., Konermann, S., Trevino, A. E., et al. (2013a). Double nicking by RNA-guided CRISPR Case for enhanced genome editing specificity. *Cell* 154 (6), 1380–1389. doi:10.1016/j.cell.2013.08.021.

RAUSAND, M.; ØIEN, K. The basic concepts of failures analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 53, n. 1, p. 73-83, 1996.

RIBEIRO, F. C. *et al.* Cana de açúcar no cenário energético tocantinense: influência da adubação química sobre variáveis agroindustriais. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 24-37, 2015.

ROSITA, K.; RADA, M. Equipment Reliability Optimization Using Predictive Reliability Centered Maintenance. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND APPLICATIONS*, 8., 2021, Chengdu, China. 2021. p. 348-354.

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. 2008. 298 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SEGATO, S. V. *et al.* **Atualização em produção de cana-de-açúcar I**. Piracicaba: Prol, 2006.

SHERWIN, D. J. A review of overall models for maintenance management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 6, n. 3, p. 138-164, 2000.

SILVA, A. D. Gestão Estratégica de Manutenção no Ambiente de Manufatura Enxuta. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 25., 2005, Porto Alegre. Porto Alegre: ABEPRO, 2005. 1 CD-ROM.

SILVA, B. C. DA. **Controle PID adaptativo sintonizado por técnicas computacionais inteligentes**. 2015. 103 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2015.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2002.

TSANG, A. H. C. Strategic dimensions of maintenance management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 8, n. 1, p. 7-39, 2002.

USTULIN, E. J.; SEVERO, J. R. **Cana-de-açúcar**: proteger o ambiente e continuar gerando empregos.

WANG, R. *et al.* New elevator energy feedback control system design based on Fuzzy PID controller. *In: POWER ENGINEERING AND AUTOMATION CONFERENCE, 2012, Wuhan, China. IEEE, 2012. p. 645-650.*

WEI, Y. *et al.* Complex cis-regulatory landscape of the insulin receptor gene underlies the broad expression of a central signaling regulator. **Development**, v. 143, n. 19, p. 3591-3603, 2016.

YANG, S. K. A condition-based failure-prediction and processing-scheme for preventive maintenance. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 52, n. 3, p. 373-383, set. 2003.

YESIL, E. *et al.* Fuzzy cognitive maps learning using Artificial Bee Colony optimization. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS, 2013, Hyderabad, India. IEEE, 2013. p. 1-8.*

ZADEH, L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. **Information Sciences**, v. 8, n. 3, p. 199-249, 1975.
Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0020025575900365>.
Acesso em: 10 ago. 2022.