

Uma Ferramenta de Suporte para Definição de Prioridade de Demandas de Manutenção Industrial Baseada em Lógica *Fuzzy*

Renan O. Souza*.

Raphael M. Sepulcri.**

Prof. Dr. Daniel C. Cavalieri***

**Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, ES, BRA*
(e-mail: renansouzatec@gmail.com)

***Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, ES, BRA*
(e-mail: rmsepulcri@gmail.com)

****Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, ES, BRA*
(e-mail: dcruzcavalieri@gmail.com)

Resumo: Nesta pesquisa foi desenvolvido um sistema inteligente em Lógica *Fuzzy* capaz de definir a prioridade das demandas de manutenção industrial com base em diretrizes previstas na política de manutenção de uma empresa do ramo petrolífero atuante no território brasileiro. Tal sistema serve como ferramenta de apoio a estes Programadores de Manutenção. O Estudo de Caso foi realizado sobre a carteira de programação de Piúma/ES, Vitória/ES, Aracruz/ES e Linhares/ES, e os principais resultados obtidos foram: a facilitação da sistemática de priorização aos Programadores de Manutenção; a previsibilidade de demandas de longa duração com alto potencial de vencimento; a otimização de recursos humanos na execução das tarefas de Programação de Manutenção com reduções de custos; o aumento da qualidade e padronização da sistemática de priorização e; maior governança para os gestores.

Palavras-chaves: lógica *fuzzy*; programação de manutenção; priorização de ordens de manutenção; *Robotic Process Automation*.

1. INTRODUÇÃO

Para empresas do ramo industrial a busca contínua por melhoria nas políticas de manutenção é fundamental para que as reduções de custos sejam mais expressivas. Segundo TAVARES (1999), políticas inadequadas de manutenção devem refletir em mais custos de mão-de-obra e estoques, clientes insatisfeitos e produtos de má qualidade. Complementando, KARDEC (2009) discute que são gerados custos mensuráveis (horas extras, perdas de contrato etc), além de outras perdas não mensuráveis (desgaste da imagem da empresa) em decorrência destas políticas inadequadas.

Já MARÇAL e SUSIN (2005) descrevem que mantenedores, engenheiros e demais profissionais de manutenção deparam-se atualmente com as mais complexas tarefas na atividade de manutenção e para se assegurarem de cumprir tais tarefas assertivamente, esses profissionais buscam ferramentas que possam auxiliá-los neste sentido.

Para TAVARES (1999), uma das principais responsabilidades avaliadas em um processo de análise e diagnóstico de uma área de manutenção é o cumprimento dos prazos de atendimentos das demandas de manutenção. Neste sentido, a seleção adequada das demandas que devem ser priorizadas se trata de um processo importante e frequente, sendo uma das atribuições do Programador de Manutenção. Todavia, considerando em especial o volume significativo de demandas (pendentes, em execução e concluídos) a serem analisadas, a existência de uma ferramenta que o auxilie na

priorização adequada dos serviços torna-se extremamente relevante para obtenção de maior produtividade e mitigação de falhas nesta sistemática.

Em geral, os sistemas de gerenciamento de manutenção se limitam a realizar ordenações mais simples, como por tipo de equipamento, por prazos e por outras características que podem ser identificadas nos documentos denominados como Ordens de Manutenção – OM. Neste sentido, entende-se que cabe à cada organização desenvolver sua sistemática com base em sua política de manutenção.

Vale ressaltar que as políticas de manutenção estabelecidas pelas empresas geralmente são fundamentadas por diversas exigências em formato de regras e restrições, além de critérios muitas vezes conflitantes entre si, o que eleva o nível de subjetividade na priorização de demandas. Um agravante neste sentido é que tal subjetividade agrega para um aumento da variabilidade de entendimentos e performance entre Programadores de Manutenção de uma mesma organização.

No caso da empresa que foi objeto do estudo de caso desta pesquisa, a política de priorização de demandas de manutenção é definida por um documento interno da empresa (TP/DDT/ENGEOP/MDT/PCM 000093). Apesar da existência deste documento, o comprometimento de os Programadores de Manutenção o seguirem na íntegra é baixo dada a sua complexidade de entendimento e execução. Entende-se que este seja um dos motivos para problemas como perda de prazo, acúmulo de OM vencidas e impactos nos indicadores de manutenção monitorados pelas gerências,

sob risco de impactos operacionais, regulatórios, segurança, meio ambiente, contratuais e financeiros, bem como sobre a imagem da companhia.

Em contrapartida, identificou-se também que nesta política de priorização da companhia não se definem claramente estratégias para tratar atividades de durações elevadas que envolvem necessidades de: contratação, compras, autorizações específicas de outros setores da companhia, calibrações de válvulas de segurança de pressão (PSV) e tratamento de Recomendações de Inspeção. É fundamental que atividades como estas sejam iniciadas com a maior antecedência possível dentro da tolerância de tempo estabelecida pela OM, prática esta que aumentaria ainda mais a complexidade da sistemática de priorização a ser executada pelo Programador de Manutenção.

No sentido de solucionar estes tipos de problema de complexidade elevada por dependerem da capacidade de interpretação humana, o professor L. A. Zadeh, da Universidade de Berkeley, USA, sugeriu uma teoria alternativa de conjuntos, onde a passagem da pertinência para a não pertinência relacionada a um determinado conjunto fosse gradual, diferentemente das tomadas de decisão binárias cuja passagem de um estágio para o outro ocorre de forma abrupta (BILOBROVEC, 2005). Esta teoria ficou conhecida como Lógica *Fuzzy* e tem sido amplamente utilizada (IVANQUI, 2005), especialmente por ser capaz de lidar com informações imprecisas do nosso dia-a-dia (ZADEH, 1987).

Sendo assim, nesta pesquisa propõe-se solucionar as falhas de priorização de demandas de manutenção industrial a partir do desenvolvimento de uma ferramenta de suporte ao Programador de Manutenção baseada em Lógica *Fuzzy*. A expectativa é que esta ferramenta seja capaz de buscar automaticamente as OM de responsabilidade de uma área específica no sistema de gerenciamento da manutenção e ordená-las conforme a política de manutenção pré-estabelecida.

2. METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa está estruturada a partir dos seguintes tópicos: Modelagem da sistemática anterior de priorização de demandas utilizada pelos Programadores de Manutenção; Modelagem da sistemática de priorização de demandas prevista na política de manutenção da empresa; Seleção da técnica mais adequada para reproduzir o modelo de priorização da empresa; Desenvolvimento do algoritmo de priorização de demandas. Desenvolvimento do algoritmo de automatização da sistemática de priorização de demandas.

2.1 Sistemática de priorização de demandas praticada pelos Programadores de Manutenção

O Programador de Manutenção é o profissional responsável por gerir uma carteira de demandas de sua respectiva área de atuação (PP-1TP-00008-A). Cada demanda desta carteira é definida no sistema de gerenciamento de manutenção como uma OM. Assim, uma carteira pode ter de 200 a 600 OM conforme parcialmente mostra a tabela 1.

Tabela 1: Exemplo de parte de uma carteira de programação obtida do sistema de gerenciamento da manutenção (autoria própria).

Ordem	Texto breve	Tol. mínima	Tol. máxima
52404275	ELE - Prev. Painéis de S.Starter TVT	11.08.2022	29.08.2022
52411697	ELE - Prev Transformadores 008 e 010	09.01.2023	14.02.2023
52407632	MEC - Prev. Compressores de ar	14.09.2022	26.09.2022
52407630	INS - Prev. PLC 's do Terminal TEVIT	29.08.2022	10.09.2022
52408579	Prev. Mensal Painéis Elétricos -TVT	22.08.2022	01.09.2022
52363458	INS - ROTA Calib.Manômetro NR13 TEVIT	14.07.2022	18.09.2022
52405994	MEC-ROTA 06 Prev. Válvulas - Bombas	29.08.2022	16.09.2022
52411663	MEC-ROTA05.Lubri. Válvulas Mbs 26 e 27	23.10.2022	10.11.2022
52407637	MEC - Prev. Manutenção MB-26 e MB-27	12.09.2022	18.10.2022

O atributo mais importante das OM são o “prazo de vencimento”, representado na tabela 1 como “tol. máxima”. Quando uma OM vence, pode haver impacto contratual, regulatório, de segurança e meio ambiente, incorrendo em multas e danos à imagem da companhia.

Considerando que a intenção principal é evitar que OM vençam, geralmente o Programador de Manutenção organiza sua carteira de forma crescente quanto ao prazo e, assim, as OM programadas para a próxima semana seguem respectivamente a sequência de priorização a seguir:

- Todas as demandas de 0 a 12 dias do seu vencimento, considerando que 12 dias corresponde a antecedência mínima que a programação das demandas de manutenção deve ser disponibilizada referente à semana seguinte;
- Um percentual de demandas com mais de 12 dias para vencer, mas que oferecem algum risco de não serem atendidas no prazo caso não iniciem com a antecedência devida;
- Um percentual de demandas que já venceram, porém, conforme “bom senso” do Programador de Manutenção.

A figura 1 apresenta esta sistemática de forma gráfica, onde a “priorização das OM” (ordenadas) é definida em função da quantidade de “dias para vencer” (abscissas) das OM.

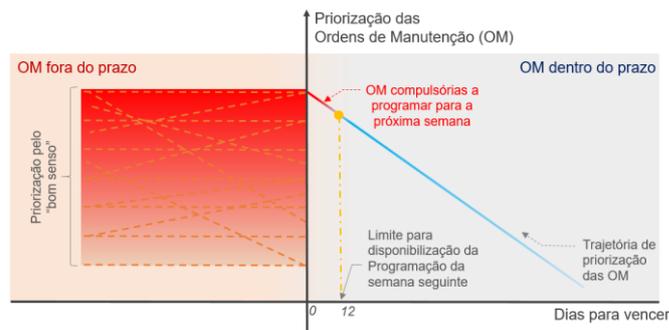


Figura 1: Sistemática de priorização das OM utilizada pelos Programadores de Manutenção (autoria própria).

O problema desta sistemática é não seguir uma estratégia mais robusta para mitigar de forma suficiente o risco de vencimento das OM. Neste sentido, o setor de Planejamento e Controle da Manutenção - PCM da empresa estabeleceu em sua política de manutenção as diretrizes de priorização aplicáveis.

2.2 Sistemática de priorização de demandas prevista pela política de manutenção da empresa

As diretrizes de priorização estabelecidas pela política de manutenção da empresa levam em consideração as seguintes variáveis:

- Dias para vencer: Trata-se da quantidade de dias que falta para uma OM vencer;
- Tipo de manutenção: Corretiva, Inspeção, Preditiva, Preventiva e Detectiva;
- Criticidade: Classificação que define a importância do equipamento ou instrumento na planta ou no processo. Os parâmetros considerados são: Normal, Importante e Crítico;
- Prioridade inicial: Trata-se de uma variável definida inicialmente pelo próprio sistema de gerenciamento. Pode ser subdividido de duas formas:
 - 1, 2, 3, 4, 5 e 6: Classificação que ocorre com base em uma matriz que relaciona o tipo de falha (incipiente, crítica e degradada) com a Criticidade (Normal, Importante e Crítico) do equipamento em caso de falha. Parâmetro utilizado apenas para casos de manutenção corretiva.
 - P, Q, R, S e T: Classificação que ocorre em casos de Recomendações de Inspeção, cujo prazo de atendimento é definido em função do entendimento do Inspetor de Manutenção com prazos de 24h, 24h, 120 dias, 360 dias e 720 dias respectivamente.
- Lista específica: Trata-se de equipamentos que compõem determinadas listas de controle específicas que requerem ações de controle extras, tais como: Equipamentos elétricos, Equipamentos controlados e equipamentos do Centro de Diagnóstico de Máquinas.

Mediante análise destas variáveis e outras diretrizes do referido documento interno, com suporte da equipe de PCM obteve-se o modelo conceitual ilustrado na figura 2.

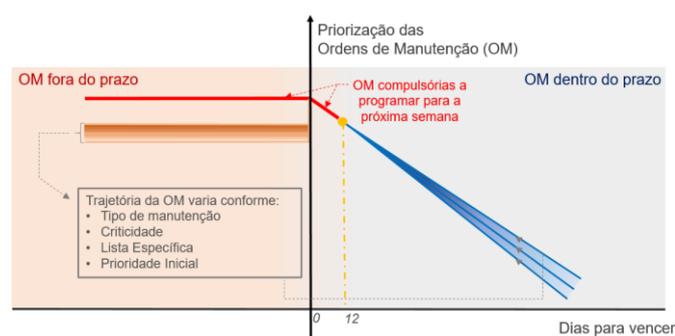


Figura 2: Sistemática de priorização das OM prevista pela empresa (autoria própria).

Pela figura 2 observa-se os seguintes grupos de prioridade:

- A maior prioridade é pela execução de manutenções vencidas relacionadas a Preventivas em equipamentos de criticidade A, Recomendações de Inspeção, Calibração de PSV e outras emergências conforme a linha horizontal vermelha à esquerda do eixo das ordenadas (PE-1TP-00079-0);

- A 2ª maior prioridade são as manutenções que vencem no intervalo de até 12 dias (seguimento de linha inclinada vermelha à direita do eixo das ordenadas);
- Todas as demais manutenções possuem menor prioridade (linhas em laranja e azul), porém, confrontando a posição destas linhas com o eixo central, é evidente que haverá uma concorrência na priorização das manutenções dentro e fora de prazo.

Um dos problemas desta sistemática é a complexidade de implementação, uma vez que exige do Programador de Manutenção uma análise bem mais demorada (perda de produtividade). Outro problema desta sistemática é não definir claramente estratégias para tratar atividades de durações elevadas que envolvem necessidades de: contratação de serviços externos, compras de materiais, autorizações específicas de outros setores da companhia (ex.: Operação, Medição & Qualidade), calibrações de válvulas de segurança de pressão (*Pressure Safety Valves – PSV*) e tratamento de Recomendações de Inspeção (RI). Considerando ser fundamental que atividades como estas sejam iniciadas com a maior antecedência possível, incluiu-se na ferramenta proposta uma tratativa sobre a variável “longa duração” conforme a figura 3.

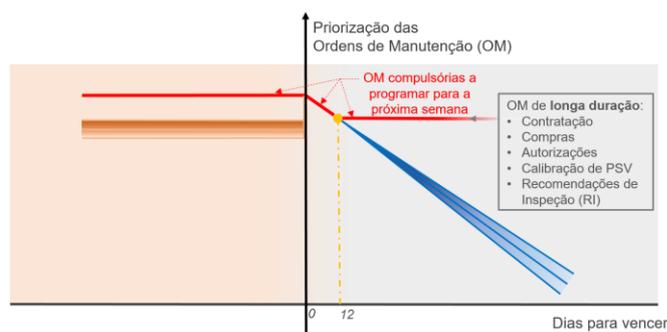


Figura 3: Sistemática de priorização das OM prevista pela empresa complementada à priorização das demandas de longa duração (autoria própria).

Pela figura 3 considera-se que a 3ª maior prioridade são as manutenções de longa duração que ainda não venceram (linha horizontal vermelha à direita do eixo das ordenadas). Para um melhor entendimento sobre as prioridades estabelecidas na figura 3, foram definidos respectivamente os Grupos de Prioridades I, II, III, IV e V conforme ilustrado na figura 4.

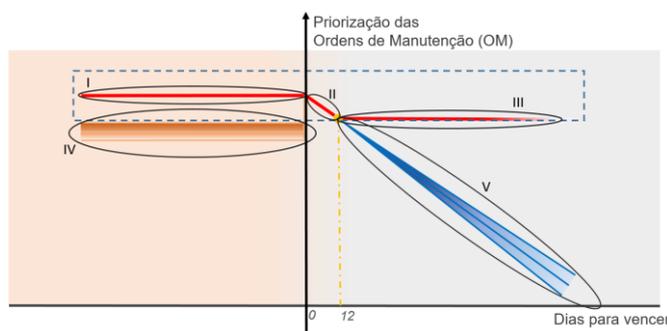


Figura 4: Sistemática de priorização das OM prevista pela empresa conforme Grupos de Prioridade (autoria própria).

O retângulo pontilhado nesta figura define os Grupos I, II e III como os mais importantes a serem analisados pelo Programador de Manutenção quanto à viabilidade de programação no horizonte dos próximos 12 dias. Nesta mesma figura fica evidente que os Grupos de Prioridades I, II, III, IV e V, de forma geral, já estão em uma sequência de prioridade, exceto pela concorrência em um pequeno trecho de pontuação *Fuzzy* entre grupos 4 e 5. Observa-se também que as OM de cada grupo tendem a concorrer internamente com as demais OM de seu mesmo grupo.

Por fim, para que a ferramenta atenda a política de manutenção da companhia, a expectativa é que tal política sejam traduzida para uma linguagem algorítmica, ou seja, convertida de forma tal que um sistema seja capaz de interpretá-la e utilizá-la para formação de uma base de conhecimento para tomadas de decisão posteriores. Entende-se que esta é a parte central da ferramenta cujo desenvolvimento será o foco deste artigo.

2.3 Seleção da técnica mais adequada para reproduzir o modelo de priorização de demandas da empresa

Considerando o modelo proposto na figura 3, alguns pré-requisitos foram estabelecidos para a determinação da técnica de priorização mais adequada conforme a seguir:

- As técnicas tradicionais de tomadas de decisão com múltiplos critérios (ex.: *Analytic Hierarchy Process - AHP*) (MORITA, 2000), não são aplicáveis, pois em geral requerem uma hierarquia fixa entre as variáveis utilizadas por meio de pesos, algo inviável para o modelo em questão em que a importância das variáveis varia no tempo;
- As técnicas de sistemas inteligentes orientadas à aprendizagem supervisionada não são aplicáveis, pois, como não há listas de demandas já sequenciadas que sirvam como referência, ou seja, que atendam a política de manutenção da empresa, não há uma saída esperada para se treinar um modelo;
- As técnicas não-supervisionadas de clusterização poderiam ser aplicadas parcialmente apenas na identificação dos grupos de prioridade conforme final da seção 2.2, porém, não seriam capazes de hierarquizar demandas entre grupos distintos, uma vez que há grupos que competem entre si.
- As técnicas de sistemas especialistas são capazes de realizarem hierarquização de eventos. Entretanto considerando que o modelo proposto é baseado em regras pré-determinadas na política de manutenção e possui subjetividade dada a natureza humana na comparação entre as variáveis para definição de prioridade da demanda (RUSSEL, 2013), conclui-se que a *Lógica Fuzzy* é a técnica que melhor se enquadra nesta pesquisa.

2.4 Desenvolvimento do algoritmo de priorização de demandas

Para desenvolvimento do algoritmo de *Lógica Fuzzy* foi utilizada a linguagem de programação *Python* com suporte da

biblioteca *skfuzzy*. Foram definidas as variáveis linguísticas antecedentes com base nas mesmas variáveis originadas do sistema de manutenção. As variáveis linguísticas consequentes e as regras de definição da base de conhecimento foram definidas em reunião com a equipe de especialistas da companhia mediante a interpretação da política de manutenção da empresa conforme proposto em FERNANDES, 1996. Como sistema de inferência foi utilizado o modelo Mandani por apresentar maior consistência nos resultados, base de regras mais intuitiva e interpretável e maior poder expressivo quando comparado ao sistema Sugeno (HALMAM, 2008). Já na defuzzificação foi utilizado o método centróide por geralmente produzir saída mais regular (FERNANDES, 1996)

As variáveis linguísticas antecedentes utilizadas foram as mesmas utilizadas na seção 2.2. Trata-se das variáveis obtidas do sistema de manutenção. Os universos de discurso de cada variável foram definidos conforme a respectiva quantidade possível de parâmetros de cada uma. As funções de pertinência (FP) foram definidas com base em: (i) precisão; (ii) estabilidade; (iii) facilidade de implementação; (iv) manipulação e (v) manutenção (FERNANDES, 1996). Todos os valores foram detalhados nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Variáveis linguísticas antecedentes e respectivos universos de discurso e funções de pertinência da Lógica Fuzzy da inteligência de ordenação (autoria própria).

Variável Linguística Antecedente	Universo de discurso			Função de Pertinência
	Início	Fim	Passo	Nome
Dias restantes	-360	361	1	IMEDIATA
				PRIORITARIA_EM_DIA
				PRIORITARIA_VENCIDA
				OPORTUNIDADE
Tipo de manutenção	0	5	1	ZCOR
				ZPLANEJADA
				OUTRAS
Prioridade Inicial	0	12	1	1 (24H)
				P = Q (24H)
				R (120 DIAS)
				2 (10 DIAS)
				S (360 DIAS)
				T (730 DIAS)
				3 (30 DIAS)
				4 (60 DIAS)
				5 (90 DIAS)
				6 ou OUTRA (180 DIAS)
Criticidade	0	5	1	A
				B
				C ou ""
Lista Específica	0	4	1	LISTA_PRIORIDADE
				DEMAIS_EQUIPAMENTOS
Necessidade Externa	0	4	1	NÃO
				SIM

A FP do tipo Triangular foi utilizada apenas para as variáveis linguísticas Tipo de Manutenção, Prioridade Inicial, Criticidade, Lista Específica e Necessidade Externa. Por se tratarem de variáveis cujos valores possuem um caráter qualitativo sem qualquer subjetividade, espera-se que tenham

pertinência máxima à referida FP. Por exemplo, se na função de pertinência ZCOR a pertinência máxima está no valor 3 (pois o parâmetro 2 representa o topo da FP Triangular), então uma OM do tipo ZCOR sempre deverá fornecerá exatamente o valor 3.

Tabela 3: Descrição das funções de pertinência das variáveis linguísticas antecedentes da Lógica Fuzzy da inteligência de ordenação (autoria própria).

Nome	Tipo da FP	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3	Parâmetro 4
IMEDIATA	Gaussiana combinada	0	0,3	0	5
PRIORITARIA_EM_DIA	Gaussiana combinada	15	5	15	60
PRIORITARIA_VENCIDA	Gaussiana combinada	-90	60	-1	0,3
OPORTUNIDADE	Gaussiana combinada	135	45	135	45
ZCOR	Triangular	2	3	4	
ZPLANEJADA	Triangular	1	2	3	
OUTRAS	Triangular	0	1	2	
1 (24H)	Triangular	9	10	11	
P = Q (24H)	Triangular	8	9	10	
R (120 DIAS)	Triangular	7	8	9	
2 (10 DIAS)	Triangular	6	7	8	
S (360 DIAS)	Triangular	5	6	7	
T (730 DIAS)	Triangular	4	5	6	
3 (30 DIAS)	Triangular	3	4	5	
4 (60 DIAS)	Triangular	2	3	4	
5 (90 DIAS)	Triangular	1	2	3	
6 ou OUTRA (180 DIAS)	Triangular	0	1	2	
A	Triangular	2	3	4	
B	Triangular	1	2	3	
C ou ""	Triangular	0	1	2	
LISTA_PRIORIDADE	Triangular	1	2	3	
DEMAIS_EQUIPAMENTOS	Triangular	0	1	2	
NÃO	Triangular	0	1	2	
SIM	Triangular	1	2	3	

Já a função de pertinência do tipo Gaussiana Combinada foi utilizada apenas para a variável linguística Dias Restantes. Isso porque enquanto o uso da FP Gaussiana simples permitiria o ajuste de 3 parâmetros (sendo o parâmetro 2 o de máxima pertinência e os parâmetros 1 e 3 de mínima), a FP Gaussiana Combinada permite o ajuste de 4 parâmetros, sendo o parâmetros 2 e 3 de máxima pertinência e os parâmetros 1 e 4 de mínima). A escolha deste tipo de FP proporcionou maior uma maior facilidade no processo de ajuste fino da ferramenta para que se aproximasse do modelo apresentado na figura 3, tendo permitido que a variação dos Dias Restantes de uma FP para outra ocorresse suavemente.

Foi criada também a variável linguística consequente denominada "Pontuação Fuzzy". Trata-se do resultado que se espera a partir do cruzamento das informações obtidas do sistema de manutenção, o qual pretende-se utilizar para ordenar a carteria de OM da maior para a menor pontuação. Os respectivos universo de discurso e as funções de pertinência foram definidos heurísticamente (MATTOS, 2001). Todos os valores foram detalhados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Variável linguística consequente e respectivos universo de discurso e funções de pertinência da Lógica Fuzzy (autoria própria).

Variável Linguística Consequente	Universo de discurso			Função de Pertinência
	Início	Fim	Passo	Nome
PONTUAÇÃO	0	113	1	TOPO_01
				TOPO_02
				TOPO_03
				TOPO_04
				TOPO_05
				TOPO_06
				TOPO_07
				TOPO_08
				TOPO_09
				TOPO_10
				TOPO_11
				MUITO_ALTA_01
				MUITO_ALTA_02
				MUITO_ALTA_03
				MUITO_ALTA_04
				ALTA_01
				ALTA_02
				ALTA_03
				ALTA_04
				ALTA_05
				ALTA_06
				MEDIA_01
MEDIA_02				
BAIXA_01				
BAIXA_02				
MUITO_BAIXA_01				
MUITO_BAIXA_02				
FUNDO				

Tabela 5: Variável linguística consequente e respectivos universo de discurso e funções de pertinência da Lógica Fuzzy (autoria própria).

Nome	Tipo da FP	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3	Parâmetro 4
TOPO_01	Trapezoidal	107	108	111	112
TOPO_02	Trapezoidal	103	104	107	108
TOPO_03	Trapezoidal	99	100	103	104
TOPO_04	Trapezoidal	95	96	99	100
TOPO_05	Trapezoidal	91	92	95	96
TOPO_06	Trapezoidal	87	88	91	92
TOPO_07	Trapezoidal	83	84	87	88
TOPO_08	Trapezoidal	79	80	83	84
TOPO_09	Trapezoidal	75	76	79	80
TOPO_10	Trapezoidal	71	72	75	76
TOPO_11	Trapezoidal	67	68	71	72
MUITO_ALTA_01	Trapezoidal	63	64	67	68
MUITO_ALTA_02	Trapezoidal	59	60	63	64
MUITO_ALTA_03	Trapezoidal	55	56	59	60
MUITO_ALTA_04	Trapezoidal	51	52	55	56
ALTA_01	Trapezoidal	47	48	51	52
ALTA_02	Trapezoidal	43	44	47	48
ALTA_03	Trapezoidal	39	40	43	44
ALTA_04	Trapezoidal	35	36	39	40
ALTA_05	Trapezoidal	31	32	35	36
ALTA_06	Trapezoidal	27	28	31	32
MEDIA_01	Trapezoidal	23	24	27	28
MEDIA_02	Trapezoidal	19	20	23	24
BAIXA_01	Trapezoidal	15	16	19	20
BAIXA_02	Trapezoidal	11	12	15	16
MUITO_BAIXA_01	Trapezoidal	7	8	11	12
MUITO_BAIXA_02	Trapezoidal	3	4	7	8
FUNDO	Trapezoidal	0	0	1	4

As 28 FP da Pontuação foram definidas para possibilitar maior granularidade de resultados possíveis para as OM, reduzindo as chances de empate. Como no processo de alcançar o modelo proposto os ajustes foram focados nas FP da variável Dias Restantes, as FP da variável Pontuação foram definidas como trapezoidais, cujos parâmetros 2 e 3 definem a faixa de máxima pertinência e os parâmetros 1 e 4 de mínima. Considerou-se que as FP trapezoidais apresentam máxima pertinência em uma maior área, tendo proporcionado maior estabilidade durante os ajuste.

O sistema de inferência da Lógica Fuzzy foi criado a partir de 107 regras. O código em linguagem Python a seguir apresenta por exemplo como a regra 20 foi estruturada:

```
r_20 = ctrl.Rule(
    dias_restantes['PRIORITARIA_VENCIDA'] &
    tipo_OS['ZPLANEJADA'] &
    criticidade['C ou ""'] &
    lista_especifica['DEMAIS_EQUIPAMENTOS'] &
    nec_externa['SIM'],
    pontuacao['TOPO_08'])
```

Interpretando este código tem-se que:

```
Regra 20:
    Se Dias Restantes = PRIORITARIA_VENCIDA e;
    Se Tipo de Manutenção = ZPLANEJADA e;
    Se Criticidade = C ou "" e;
    Se Lista Especifica = DEMAIS_EQUIPAMENTOS e;
    Se Longa Duração = SIM;
    então Pontuação = TOPO_08.
```

Observa-se pela Regra 20 que as variáveis linguísticas antecedentes Dias Restantes, Tipo de Manutenção, Criticidade, Lista Especifica e Longa Duração são definidas por uma das suas respectivas funções de pertinência conforme tabelas 2 e 3. Já a variável linguística consequente Pontuação é definida com a função de pertinência TOPO_08 e, conforme a tabela 5, terá uma pontuação que pode variar entre 79 e 84 por serem os valores que limitam a função de pertinência referida função de pertinência do tipo trapezoidal.

2.5 Desenvolvimento do algoritmo de automatização da sistemática de priorização de demandas

Para maior rapidez nesta sistemática de priorização foram utilizadas técnicas de RPA – *Robotic Process Automation* para desenvolvimento do algoritmo, eliminando a necessidade de intervenções do Programador de Manutenção durante sua execução conforme apresentado na figura 5.



Figura 5: Fluxo de funcionamento da ferramenta de priorização com base em técnicas de RPA para desenvolvimento do algoritmo (autoria própria).

Como resultado da execução do algoritmo uma carteira de OM é gerada conforme exemplificado na tabela 6, destacando-se a pontuação Fuzzy informada na última coluna.

Tabela 6: Carteira de manutenção ordenada conforme priorização Fuzzy (autoria própria).

Ordem	Texto breve	Tipo de ordem	Crit.	Priorid. Inicial	Longa Dur.	Dias p/ Vencer	Lista Esp.	Pont. Fuzzy
52262720	M2 - M4 - VÁLVULA ATUADA EM CAMPO	ZCOR	A	2		-1	X	105,29529
52274845	M2-PSV DANDO PASSAGEM (ESTANQUEIDADE)	ZCOR	A	2		-1	X	105,29529
52272016	M2-VERIFICAR VASAMENTO NO SISTEMA XV414B	ZCOR	A	2		1		104,18944
52249335	BOROSCOPIA 4000H OU 1 A TC_C PIUMA	ZPRD	B	6		1	X	104,07384
52213329	MANUT PRV TRANSMIS INDIC TEMP TIT-105B	ZPRV	C	4		0		103,82875
52270919	MANUT UPS, SPDA E ILUM - ECOMP PIUMA	ZPRV	C	4		1		103,72705
52276654	MANUTENÇÃO INSPEÇÃO SAO	ZPRV	C	4		1		103,72705
52278094	MANUT PRV TMP AQUECEDOR P-4155.41002B	ZPRV	B	4		2	X	103,68337
52235524	INSPEÇÃO INTERNA PSV	ZINS	A	3		4	X	103,5263
52276125	MANUT TMP MOTOGERADOR A - PIUMA	ZPRV	C	4		2		103,30351
52262281	M2-M4 TROCAR GRADE PROT OXI RESF GAS CA	ZCOR	A	4		2	X	103,24019
52253556	MANUT MST 1A OU 4000H MG-B- PIUMA (M)	ZPRV	C	4		3		102,64381
52261894	MANUTENÇÃO VÁLVULA SDV-01 - UTGSUL	ZPRV	A	4		4		102,20976
52251436	INSP. EXT. VASO V-XV-4155.41415A	ZINS	A	3		4	X	102,20976
52271543	Col. vibração cj. C-41001C EC Piuma	ZPRD	B	2		4	X	102,13

3. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Para o presente estudo de caso foram analisadas as carteiras de OM dos Programadores de Manutenção das bases Piúma/ES, Vitória/ES e Aracruz/ES, onde foram submetidas à avaliação do algoritmo proposto simultaneamente, gerando o gráfico de dispersão em que a priorização das OM ocorre pela pontuação Fuzzy em função da quantidade de dias para vencer de cada uma delas conforme a figura 6, onde cada ponto representa uma OM.

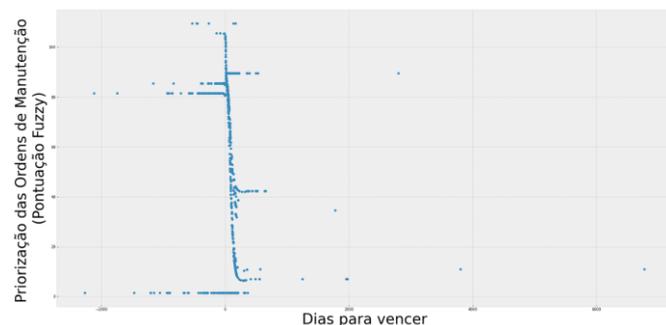


Figura 6: Distribuição das OM conforme priorização Fuzzy em função da quantidade de dias para vencer (autoria própria).

A partir da figura 6 identificou-se que:

- As OM de maior pontuação (topo) foram geradas mediante a falha no processo de geração da mesma no sistema de gerenciamento de manutenção da empresa, sendo outliers que podem ser desprezadas sem prejuízo à análise dos resultados;
- As OM de menor pontuação (fundo) não impactam indicadores de manutenção por não serem relevantes, cabendo programá-las apenas mediante solicitação da liderança, sendo outliers que podem ser desprezadas sem prejuízo à análise dos resultados;
- As OM que vencem em mais de 360 dias ou vencidas a mais de 360 ocorrem em pequena quantidade e podem ser desprezadas sem prejuízo à análise dos resultados.

Sendo assim, após o descarte das OM supracitadas, foi gerada a figura 7.

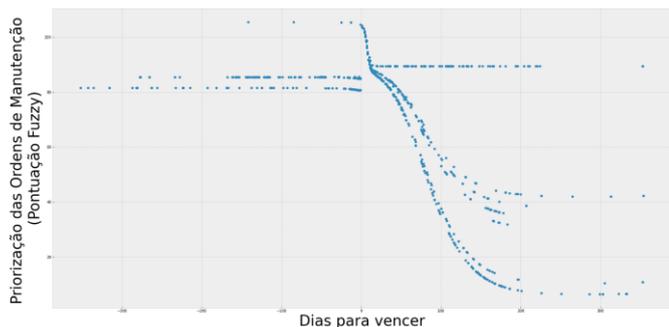


Figura 7: Distribuição das OM conforme priorização Fuzzy em função da quantidade de dias para vencer, restrito à -360 a 360 dias do vencimento e após eliminação de OM desprezadas (autoria própria).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para análise dos resultados considerou-se a inviabilidade de se isolar o efeito da implementação da nova sistemática sobre os indicadores de manutenção, uma vez que, além da qualidade da sistemática de priorização, tais indicadores podem ser influenciados diversos fatores, tais como: duração do processo de compras e contratações; disponibilidade de mão-de-obra e/ou outros recursos; duração do processo de autorização e/ou apoio de outros setores para a execução do serviço e; outros fatores de natureza humana (ex.: falha nos registros de execução; falha na definição dos planos de manutenção). Sendo assim, analisou-se os resultados entre as sistemáticas anterior e proposta conforme tópicos a seguir.

4.1 Aderência aos grupos de prioridade

Para avaliar o algoritmo quanto à aderência aos grupos de prioridade da figura 4 conforme as diretrizes de priorização da política de manutenção, tais grupos foram replicados na figura 8-

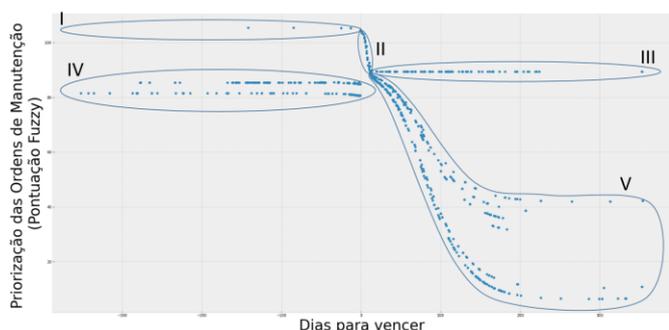


Figura 8: Agrupamento de OM em grupos de prioridade (autoria própria).

A partir desta figura fica evidente que os grupos I, II, III, IV e V segue a disposição a figura 4 de forma a atender estratégia proposta. Analisou-se também que não houveram falhas na alocação das OM em cada grupo de prioridade.

4.2 Aderência à estratégia de priorização das ordens de manutenção internas em cada grupo de prioridade

Nos grupos I, II e III os pontos correspondentes às OM podem ser interpolados compondo uma linha única em cada grupo. Desta forma, é possível concluir não há concorrência interna entre as OM em cada um destes grupos, a não pela quantidade de dias para que estas OM vençam. Por outro

lado, na grupo IV observa-se pelo menos 2 possíveis linhas, indicando que todas as OM na linha de cima possui prioridade superior às OM da linha de baixo. Da mesma forma ocorre com o grupo V, o qual possui pelo menos 6 possíveis linhas. Isto pode ser melhor analisada a partir da figura 9, concluindo-se que o algoritmo distingue as OM quanto à sua importância mediante às regras da Lógica Fuzzy que combinam as variáveis antecedentes.

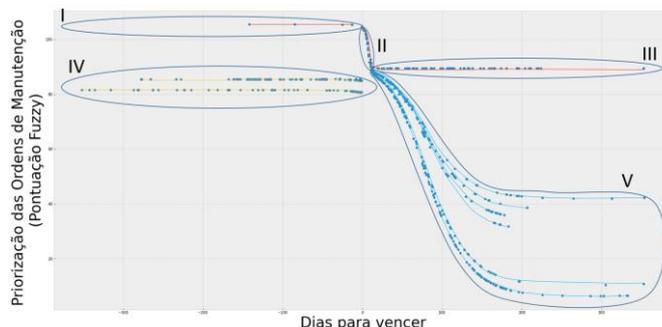


Figura 9: Agrupamento de OM internamente nos grupos de prioridade (autoria própria).

Em seguida, da carteira analisada foram destacadas amostras de OM com mesma previsão de vencerem para avaliação da coerência da priorização frente a estratégia adotada. Na tabela 7 é evidenciado um exemplo de uma amostra de OM que venceriam em 76 dias. Por esta tabela é possível observar que as OM do Grupo de Prioridade III possuem mesma pontuação por serem atividades de longa duração e por isso necessitam ser antecipadas ao máximo. Neste caso, o Programador de Manutenção conseguiria atentar a estas OM com uma antecedência de 76 dias, mas poderia prever esta necessidade desde o surgimento destas OM com uso deste algoritmo.

No contexto de Manutenção, é importante destacar que, coerentemente, o algoritmo proporcionou pontuação elevada para a OM nº 52245219, considerando que a calibração de PSV, atividade prevista em regulação específica (NR-13, 2019), é fundamental para a segurança operacional do referido processo, uma vez que sua falha elimina uma importante barreira de segurança contra pressões elevadas, o que pode gerar acidentes de proporções elevadas. Neste mesmo sentido, a OM nº 52201259 também recebeu pontuação elevada por se tratar de uma RI para tratamento de pontos de corrosão em um vaso de pressão cuja tratativa também deve seguir a mesma regulação específica (NR-13, 2019) da OM anterior, porém, neste caso a corrosão torna o equipamento mais frágil para conter o produto em seu interior, podendo gerar vazamentos e acidentes.

Tabela 7: Exemplo de comparação de um conjunto de OM com vencimento nos próximos 76 dias (autoria própria).

Ordem	Texto breve	Tipo de ordem	Crit. Inicial	Prior. Inicial	Longa dur.	Dias p/ vencer	Lista Esp.	Pont. Fuzzy	Grupo
52245219	CAUB PSV-V-XV-4150.44004 - BIENAL	Preventiva	A		Sim	76	Sim	89,50	III
52201259	ATENDIMENTO A RI 20070777.	Corretiva		5	Sim	76		89,50	III
52270997	Manut Detec Filtro FT-01 A	Detectiva	A		Não	76	Sim	67,42	V
52239355	INSP.INT.VASO S-4155.41001-A1	Inspeção	B		Não	76	Sim	65,73	V
52285404	MEC - Plano Inspeção visual de Cintas	Preventiva	C		Não	76	Não	55,54	V
52252141	MANUT TMP MOTOGERADOR A - PIUMA	Corretiva		6	Não	76		53,84	V

Quando às OM do Grupo de Prioridade V da tabela 7 é possível observar que as OM foram distinguidas especialmente pela variável Criticidade. Observa-se que a OM nº 52252141 recebeu a menor pontuação também de

forma coerente, uma vez que o referido motogerador em falha possui redundância, sendo classificada com uma Priorização Inicial 6 que é a menor dentre todas as possíveis. Sendo assim, mediante a coerência na sistemática de priorização desta e de outras amostras, conclui-se que o algoritmo proposto é capaz de refletir as diretrizes de priorização da política de manutenção da empresa.

4.3 Previsibilidade de ordens de manutenção de “longa duração” no horizonte de 12 dias

Conforme discutido na seção 2.2, é necessário que OM de “longa duração” sejam observadas pelo Programador de Manutenção com a maior antecedência possível visando evitar uma tratativa tardia e, consequentemente, seu vencimento. Entende-se que a capacidade de o algoritmo prever OM de longa duração já foi evidenciado na figura 7 por meio do grupo de prioridade III.

4.4 Outros resultados relevantes

Em reunião com os Programadores de Manutenção que apoiaram a pesquisa foram mapeados outros resultados relevantes, tais como:

- Ganho de produtividade: O processo de priorização ocorre em até 10 minutos, enquanto que o programador podia demorar em média 8h, além de o novo formato de apresentação da carteira de OM facilitar a identificação rápida das OM prioritárias;
- Otimização de recursos humanos: Redução de 4 para 2 Programadores de Manutenção na gerência objeto de estudo, refletindo na eliminação de custos estimados em R\$ 260.000,00 por ano.
- Qualidade e padronização: Mediante atendimento das diretrizes de priorização previstas pela política de manutenção da companhia.

5. CONCLUSÕES

A partir desta pesquisa é possível concluir que a ferramenta de desenvolvida por meio da Lógica Fuzzy é capaz de fornecer o suporte necessário aos Programadores de Manutenção durante a sistemática de priorização de demandas de manutenção, gerando resultados satisfatórios.

Observou-se ainda que as diretrizes de priorização estabelecidas pela empresa foi modelada com sucesso, apresentando aderência satisfatória em relação aos grupos de prioridade, bem como a previsibilidade de OM de longa duração, permitindo antecipá-las para evitar inciá-las tardiamente, viabilizando atendimento ainda dentro do prazo, otimizando recursos humanos nas atividades de Programação, proporcionando maior qualidade e padronização, e permitindo uma melhor governança para os gestores.

AGRADECIMENTOS

À Cooperação CAPES/FAPES – PDPG, projeto TIC+TAC, pelo apoio financeiro (TO 133/2021, Processo Nº 2021-CFT5C) e à empresa Transpetro pela disponibilização dos dados, recursos humanos e financeiros complementares.

REFERÊNCIAS

- Bilobrovec, M. (2005) – *Sistema especialista em lógica fuzzy para o controle, gerenciamento e manutenção da qualidade em processo de aeração de grãos*. Dissertação de mestrado, Ponta Grossa/PR. p.23-24.
- Fernandes, A. M. R. (1996) – *Sistema Especialista Difuso Aplicado ao Processo de Análise Química Qualitativa de Amostras de Minerais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. p.36-44.
- Halmam A.; Georganas, N.D. (2008) – *A Comparison of Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems for Evaluating the Quality of Experience of Hapto-Audio-Visual Applications*. IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications Ottawa – Canada.
- Ivanqui, J. (2005) – *Esteira eletrônica com velocidade controlada por lógica fuzzy*. Dissertação de Mestrado. Curitiba/PR. p.14.
- Kardec, A.; Nascif, J. (2009) – *Manutenção: função estratégica*. 3ª ed. Qualitymark, Rio de Janeiro/RJ.
- Marçal, R.F.M., Susin, A.A. (2005) – O emprego de inteligência artificial como ferramenta de apoio à tomada de decisão na manutenção industrial. In: *III Seminário Catarinense – ABRAMAN*. Joinville/SC.
- Mattos, M.C. (2001) – *Sistema difuso de controle da assistência respiratória em neonatos – SARE*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC. p.55-60.
- Morita, H. (2000) - *Metodologias para estruturação e avaliação da decisão nas organizações*. Atlas. São Paulo/SP. p.392-399.
- Norma Regulamentadora Nº 13 – NR-13 (2019) – *caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento*. Ministério do Trabalho e Previdência. Distrito Federal/DF. Subitens 13.5.1.6 e 13.5.4.5.
- PE-2TP-00079-0 (2020) – *Rotina de Planejamento e Programação da Manutenção e Inspeção na DDT* (documento interno da empresa).
- PP-1TP-00008-A (2020) – *Processo de planejamento, programação e controle de manutenção industrial* (documento interno da empresa).
- Russel, S.J. (2013) – *Inteligência artificial*. Ed. Elsevier, 2013, p.643-644.
- Tavares, L.A. (1999) – *Administração moderna de manutenção*. Novo Pólo, v.01. p.7-30.
- TP/DDT/ENGEOP/MDT/PCM 000093 (2021) – *Ações de Apoio do planejamento e controle da manutenção para o enfrentamento da pandemia de COVID-19* (documento interno da empresa).
- Zadeh, L.A. (1987) – *Fuzzy sets and applications*. USA: John Wiley & Sons. p.684.