**Gestão dos Riscos de Defeitona Manufaturaatravés do FMEA e das Redes Bayesianas em integração**

**Iago de Mello Ávila¹, Rodrigo Massayuki Ono², Rogério Acioli Lopes Alves³ e**

**Moacyr Machado Cardoso Júnior4**

PPGPO – UNIFESP/ITA¹²4, CTE-F – ITA³

**RESUMO**

Em um cenárioeconômicoaberto e globalizado, indústriasbuscamformas de aumentarsuarentabilidade, tornandoseusprocessoscadavezmais simples e enxutos. Com a tendência da modernizaçãorumo à indústria 4.0, dados de processos de manufatura de todosostiposestãosendogerados e armazenadosem banco de dados, incluindo dados de defeitos e falhasdestesprocessos. Nessecontexto, o objetivo do presentetrabalho é identificarpossíveisfalhasemumaindústriamontadora de máquinas e equipamentosagrícolasatravés das ferramentas FMEA e Redes Bayesianas, avaliandosuascausas e efeitos e proporsoluções para evitaressasfalhaspotenciais. Foiconstatado que aaplicaçãotrouxemudançassignificativasnasprobabilidades de falha, identificando e mitigandoosprocessoscríticos e reduzindoem 55% a probabilidade de falha final.

**PALAVRAS CHAVE:**Processos de fabricação; FMEA; Redes Bayesianas.

**ABSTRACT**

In an open and globalized economic scenario, industries are looking for ways to increase their profitability, making their processes simpler and leaner. With the modernization trend towards industry 4.0, data from manufacturing processes of all types are being generated and stored in databases, including defect and failure data from these processes. In this context, the objective of the present work is to identify possible failures in an assembler industry of agricultural machinery and equipment through the FMEA and Bayesian Networks tools, evaluating its causes and effects and proposing solutions to avoid these potential failures. It was found that the application brought significant changes in the probabilities of failure, identifying and mitigating critical processes and reducing the probability of failure by 55%.

**KEYWORDS**: Manufacturing processes. FMEA; Bayesian Networks.

1. **INTRODUÇÃO**

Em um cenárioeconômicoaberto e globalizado, onde o acesso a tecnologias que flexibilizem e ampliem o mercado de consumidores, indústriasbuscamformas de aumentarsuarentabilidade, tornandoseusprocessoscadavezmais simples e enxutos. Especialistas no assuntoobservam que umatendência é a modernização e o processo de revolução industrial para a chamadaindústria 4.0, onde dados de todosprocessos de manufaturaficamdisponívelem banco de dados [1]. Todavia, é necessário que osuporte de especialista para analisar e tirarconclusõesassertivas a redor dos dados coletados.

Aempresaanalisada no presentetrabalho é umaindústriamontadora de máquinas e equipamentosagrícolas. O porte das máquinas é variado e seualcance é global. Desdeequipamentosmais simples e mecânicos, atémáquinasaltamentetecnológicas, com sistemas de localização por GPS e pilotoautomático. A planta é autossustentávelemtodososgrandesblocos que compõe o produto final, sendoresponsável por fazersolda, usinagem e corte de chapas.

Dentro da planta, a parte de outros processosestá a linha de montagem principal. Ela funcionaem um sistemapuxado com comando Stop & Go, com a capacidademáxima de 66 máquinas/dia ou um takt-time de 6,2 min em um mix variado de modelos de máquinas. A planta possui 300 funcionáriosdiretos nesses processos de montagem e 3 pontos de auditoria nessalinha.

O FMEA (do inglês, Failure Mode and Effect Analysis) é o métodomaisrecorrentenessemeioautomotivo, permitindoaanálise de um processoouprodutoprojetado com objetivo de redução de riscos e garantia de segurança [2]. Emespecífico, o PFMEA (a versão para processos da ferramenta) buscaolhar de forma analítica o processo por completo e antever e/oumitigarfalhasnosprocessos de manufatura, tornando todo o processoemsimaisenxuto e econômico.

As Redes Bayesianas (BBN - Bayes Belief Network) sãouma forma de representaçãográficamuitoeficientedemonstrarcorrelaçãoprobabilística e de incertezas. Composta por nós, a rede bayesiana é capaz de fluirprobabilidades e dados, que demonstram a dimensão do problema e suasligações [3]

Existemexemplosrecentesnaliteratura que corroboramtaisbenefícios da integração do FMEA com outras ferramentas: FMEA integrado com método de priorização fuzzy [4]. FMEA utilizadoem conjunto com mapascognitivos fuzzy [5]. Assimcomoaintegração FMEA e Redes Baeysianas [6], no qual o métodofoiutilizadocomo base para a elaboração do presentetrabalho.

Tendo em vista essecenário, o presentetrabalhotemcomoobjetivoconstruiruma rede bayesianabaseadanosresultados de um FMEA e nos dados de defeitoelencadosdurante o período de 2018 de umaindústriamontadora de máquinasagrícolas de grandeporte e dessa forma, apresentar um cenárioonde é possível as probabilidades para todososmodos de falhaelencados e consequência das açõestomadas.

1. **ESTADO DA ARTE**
   1. **AINDUSTRIA METALMECÂNICA E A ENGENHARIA DE PROCESSOS**

Aindústria, segundo [7], refere-se à transformação de matérias-primasemcomponentesintermediáriosouprodutosacabados por meiosfundamentalmentemecânicosdependentes de fontesinanimadas de energia. Já [8], entendeaindústriacomo um conjunto de atividades que guardamalgumgrau de correlaçãotécnico-produtiva, constituindo um conjunto de empresas que operammétodosprodutivossemelhantes, incluindo-se emumamesma base tecnológica. Aindústriapodeproduzirdesde o mais simples artesanatoaté a maiscomplexa forma de tecnologia, utilizandoosmaisrobustos e avançadosprocessos e máquinas para suaprodução. Em especial aindústriaMetalmecânica é o setor da indústria que fábrica e montapeças e ousistemas que suaconstituiçãomajoritária é composta por materiaismetálicos, como a indústriaautomobilística e a metalúrgica. Dentre as características da indústriacontemporâneaestá a produçãoenxuta, seguindo um sistema de produção, produçãopuxada, com aintensaautomatização e padronização dos processosprodutivos. Outracaracterística é a buscaintensa pela aplicação de novastecnologias, tanto nasatividadesdiretas, comonasindiretas, em todo o ciclo de vida do produto, de forma com que seus custos sejamatenuadosdevido à redução de tempo nasatividades, a flexibilização dos processos e aassertividadenatomada de decisão. [9] A Engenharia de processo é um ramo da engenhariaresponsável pela análisecrítica dos processos de fabricação e montagem. Nela, por meio da utilização de umaestruturaguiada e de umasérie de ferramentas e metodologias, o engenheiro de processo é responsável por ter a capacidadetécnica de conhecer o produto e projetar o processo ideal, respeitando as restriçõeshumanas, econômicas, de tempo e espaço da suainstalaçãofabril. Fica a cargo doengenheiro de processostambémimplementarconstantesmelhoriasnosprocessosestabelecidos, utilizando-se de novastecnologias que melhorem a velocidade e a qualidade dos processos, até a implementação de novasculturas de gestão.

* 1. **MÉTODO DE ANÁLISE DE FAHAS DE PROCESSOS – PFMEA**

Segundo [6], o principal objetivo do PFMEA é identificarpossíveisfalhas, avaliar as causas e osefeitos dessas falhas e proporsoluções para evitaressasfalhaspotenciais. O objetivo final é um produto livre de falhas no processo de produção. O PFMEA é um dos doistiposprincipais de FMEA. Quandoaplicado a fase de design, ele é definidocomo Design failure mode and effect analysis (DFMEA) e quando se refere a fase de produção é chamado de Process failure mode and effect analysis (PFMEA). Uma das diferenças entre essesdoistipos é que para o DFMEA o usuário final é um cliente, mas para o PFMEA pode ser a próximaetapaem um processo de produção. Alémdisso, o PFMEA é maiscomplicado e demorado para ser executadodo que o DFMEA.

Para o relatório do PFMEA naindústriaautomotiva, faz-se necessário o cálculo do Risk Priority Number (RPN) [10]. O número de prioridadeaorisco (RPN) é calculadomultiplicandoGravidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D), como é mostradonaEquação 1. O RPN vai de 1 a 1000 e osíndices S, O e D de 1 a 10. Açõescorretivasdevem ser tomadas a qualquermomento, mas especialmentequando RPN exceder 100 ou um dos índices S, O ou D excede 8. FMEA é principalmenteconduzidoemequipe, por meio de reuniões com equipesmultidisciplinares.

(1)

* 1. **REDES BAYESIANAS - BBN**

Redes Bayesianassãomodelosgráficosprobabilísticosconstituídos por sistemasacíclicosdirecionados com um conjunto de tabelas de probabilidadecondicionalassociadasaeles [11]. As redes sãocompostas de nós, representandovariáveis de interesse.

Segundo [11] emuma Rede Bayesiana, osnóssemnenhuma seta direcionadaaelessãochamados de nósraiz e possuemtabelas de probabilidadeincondicionaisassociados a eles. Osnós que possuemsetasdirecionadasaelessãochamados de nósfilhos e osnós que possuemsetasoriginando deles sãochamados de nóspai, comodemonstradona Fig. 1, onde X3 serianófilho e X1 e X2, osnóspais.



**Fig. 1 -** Exemplo de Rede Bayesianasimples com 3 variáveis.

Uma característica significativa das Redes Bayesianas é que quando os estados de algumas variáveis ​​em uma rede são conhecidos, é possível atualizar a probabilidade desta, dada a nova evidências, sendo possível, com isso, avaliar a criticidade de uma variável em relação ao outras [6]. Avaliar estas probabilidades, denominadas probabilidades posteriores, é a tarefa principal de uma Rede Bayesiana. E para o cálculo destas probabilidades é utilizado o Teorema de Bayes, através de equações de probabilidade condicional, onde os dados dos nós pais podem ser utilizados para gerar os valores dos nós filhos seguintes [12]. Cada filho possui uma tabela de probabilidade condicional associada a ele, dado os estados de seus nós pais. Assim, um conjunto de variáveis aleatórias {X1, X2, ⋯Xn} é atribuído aos nós. Então, a probabilidade conjunta é dada na Equação 2.

(2)

ondeé a lista dos pais do nó.

E a probabilidade marginal de é dada naEquação 3.

(3)

A principal aplicação de uma Rede Bayesiana é como um mecanismo de inferência para o cálculo da probabilidade dos eventos, dada aobservação de outros eventos, chamada de evidência. [11] Para uma Rede Bayesiana, essatarefaconsiste no cálculo da probabilidade da ocorrência de algunseventos, dadas as evidências. Suponha que umaevidência e sejaencontrada, temos:

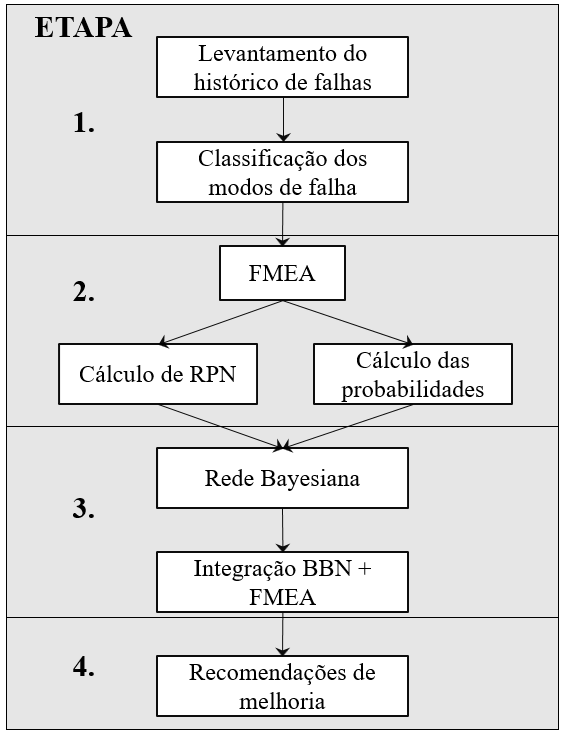
(4)

onde

Assim a tarefa de construiruma BN consisteemduasetapas. (1) Aprendizagem de estrutura: encontrarumaestruturagráfica que represente a dependência entre nós com base nos dados disponíveis (ouseja, identificarosnóspai e filho); e (2) Aprendizado de parâmetros: Quantificar a dependência entre osnósestimando as distribuições de probabilidadecondicionais [13].

1. **MÉTODO**

Conformeapresentado por [6], o método a ser utilizadanessetrabalhoseráumaintegração de umaanálise FMEA dos processos de umaindústria para criação de uma Rede Bayesiana. Aintenção por meio dessa integração de ferramentas é construir um cenáriomaisricoeminformações (com o auxílio da rede) e por meio da análisecrítica do time de especialistas, criar um mecanismomaisassertivonatomada de decisões da engenharia de processos dessa indústria. Para realizaraintegração dos métodos, utilizamos a seguinte framework, exibidanaFigura 2.



**Fig. 2 -** Framework de integração entre o FMEA e a Rede Bayesiana.

* 1. **FMEA**

O início do FMEA requer a formação de umaequipe, que geralmenteconsiste de um facilitador, um líder de equipe e especialistasfuncionais de desenvolvimento, manufatura, qualidade e outros especialistas, conformeapropriado. Aequipedeveprimeirodescrevero processo de operaçõesunitáriasemgeral, depoisdividircadaoperaçãounitáriaemsuaspartescomponentes e estimarcadapartepelosseusprincipaisparâmetros. Durante a estimativa dos parâmetros, especialmente a gravidade das falhas, as opiniões dos especialistasfrequentementedivergem. A partirdessegrupo de especialistas, foielaboradoumalistacontendooscódigosreferentes a cadafalha e suasrespectivasseveridades, e a partirdesseslevantamentos e os dados históricos de falhas, foipossívelrealizar o cálculo do RPN e, posteriormente, o cálculo das probabilidades, que serámostradonaseção dos Resultados.

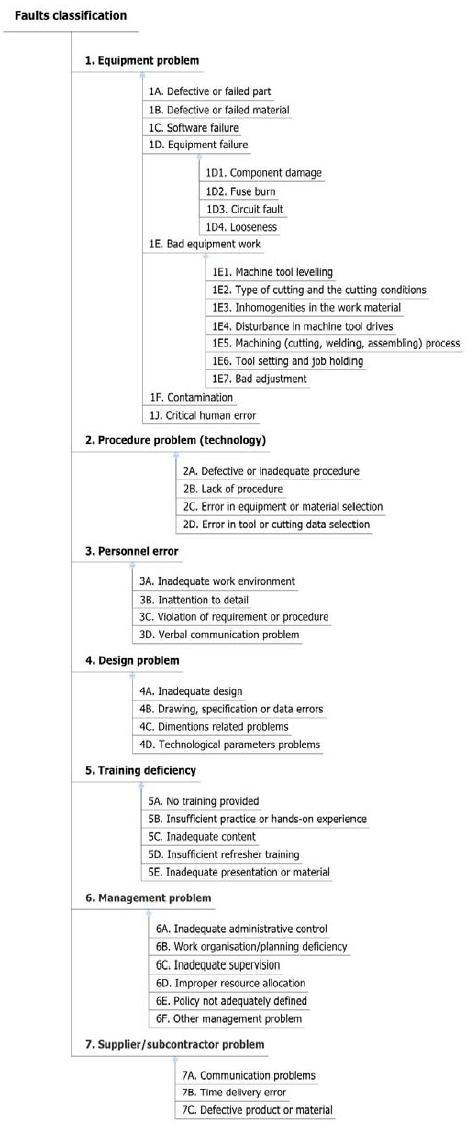
* 1. **REDES BAYESIANAS**

A partir dos resultados do FMEA, foielaboradouma rede com o objetivo de avaliar a probabilidade de defeito no produto final da linha de produção. Foientãoconstruídouma rede com 9 nós e suasrelações de causa e efeito, e com aadição dos dados das evidências, foipossívelgerarnovasprobabilidades para cada um dos nós, trazendo a simulaçãomaispróximo a realidade.

1. **RESULTADOS**
   1. **CLASSIFICAÇÃO DAS FALHAS**

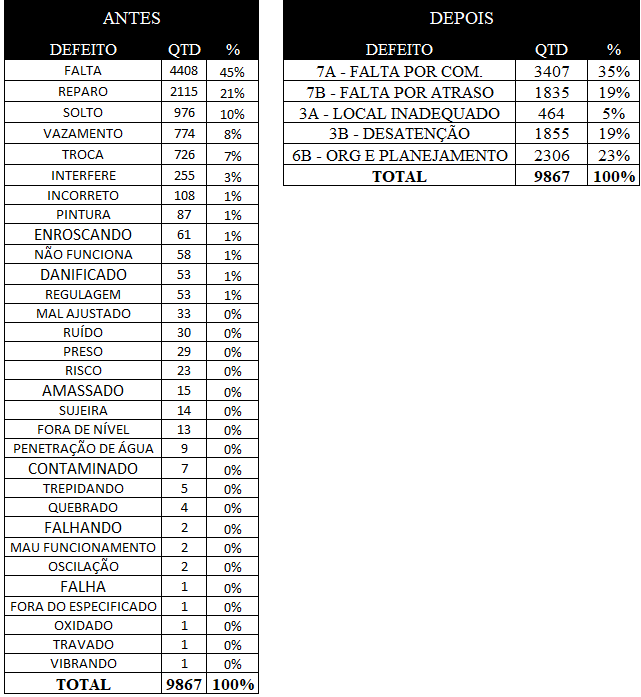
Na etapa de Classificação de Falhas, referentea Etapa 1 da figura 2, sãofeitosajustes no banco de dados extraído do ERP (Enterprise Resource Planning), um sistema de gestãointegrada, responsável por cuidar de todas as atividadesdiárias de umaempresa, do administrativoaooperacional. Aintençãoaqui é definirquaissão as principaisvariáveis que compõeosmodos de falha e suasprobabilidades. Essasinformaçõessãoimportantes para a próxima que é construção do FMEA.

Conformeapresenta [6], a classificação de falhasemumaempresa do ramo de máquinasdeveseguir o padrãodemonstradonaFigura 3.



**Fig. 3 -** Classificação de Falhasemumaempresaramo de máquinas (KOSTINA, 2012).

Foiverificado que háumagranderedundâncianos dados coletados, o que faz com os dados fiquemmaisdispersos, mesmo se tratando das mesmasfalhas. Na figura 4 é demonstrado a síntesefeita, ondereduzimos de 31 para 5 Modos de falha.



**Fig. 4 -** Síntese dos Tipos de Falha e Classificação dos Modos de Falha.

* 1. **CONSTRUÇÃO DO FMEA**

O FMEA é aanálise do efeito dos modos de falha de um processo de montagem. Nele é possívelpreverquaisaçõestomar para preveniroudiminuir a quantidade de defeitos/falha que podem ser geradosduranteosprocessos de montagem. Alémdisso, se assegurar de possíveisriscos a segurança do montador e posteriormente, do clientedurante o uso do equipamento.

Na Etapa 2, é utilizado o resultado de um FMEA. O coeficiente de RPN, é o resultado do FMEA e é tambémproduto entre osíndices de Severidade, Ocorrência e Detecção para cada um dos modos de falha. Para os 3 modos de falhafinaisidentificados, foramcalculadosseusrespectivosvalores de RPN e sãoapresentadosnaFigura 5.

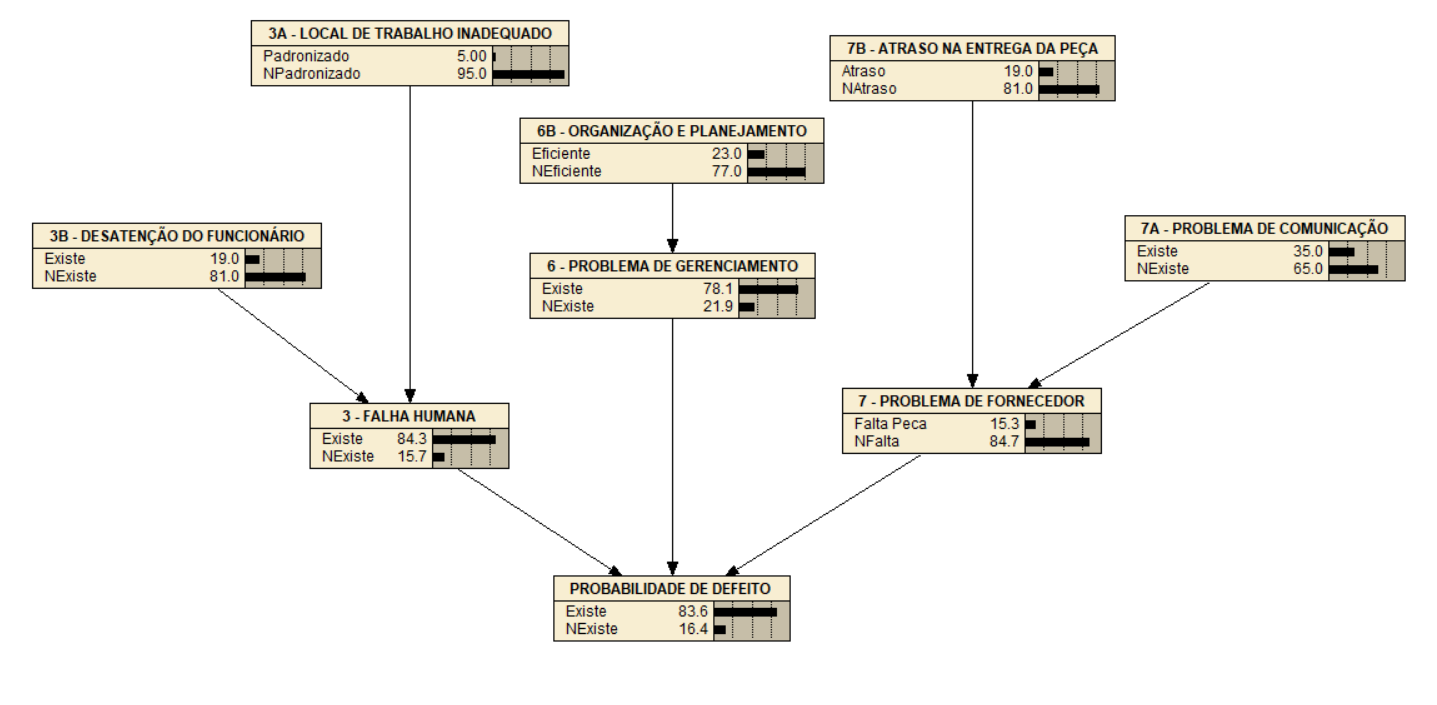


**Fig. 5 -** Análise FMEA obtida.

* 1. **REDE BAYESIANA DO SISTEMA**

Uma rede Bayesianafoiconstruídabaseadanasdiretrizes do modelo de integração entre umaaplicação de FMEA nosprocessosem conjunto. Conforme [6] explica, essainteraçãoacontece por meio dos modos de falha e dos percentuais de probabilidadeobtidos por meio da análise FMEA e da suainserçãonosnósdescritosna rede Bayesiana. Foiconstruído num primeiromomento um DAG para aopinião de um grupo de especialistassem ser feita a análise FMEA. Apósaanálise e os dados obtidosnaFigura 5 a rede foi, posteriormente, reconstruída e adaptada.

Conforme a Figura 6, foipossíveldescrever o mapa de situações que acarretamdefeitosao final da linha de montagem da indústriaanalisada. Alémdisso, é possívelsimularoscomportamentos das probabilidades, comopode ser visto naTabela 1, e suasinteirações a priori e posteriori por meio do software Netica 6.5.



**Fig. 6** - Rede Bayesiana do processoanalisado

**Tabela 1** – Tabela de probabilidadescondicionais do nóProbabilidade de Defeito.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 3 - Falha do Montador | 6 - Problema de Gerenciamento | 7 - Problema de Fornecedor | Existe(%) | Nexiste(%) |
| EXISTE | EXISTE | Falta Peça | 99 | 1 |
| EXISTE | EXISTE | Nfalta | 98 | 2 |
| EXISTE | Nexiste | Falta Peça | 95 | 5 |
| EXISTE | Nexiste | Nfalta | 85 | 15 |
| Nexiste | EXISTE | Falta Peça | 75 | 25 |
| Nexiste | EXISTE | Nfalta | 15 | 85 |
| Nexiste | Nexiste | Falta Peça | 5 | 95 |
| Nexiste | Nexiste | Nfalta | 1 | 99 |

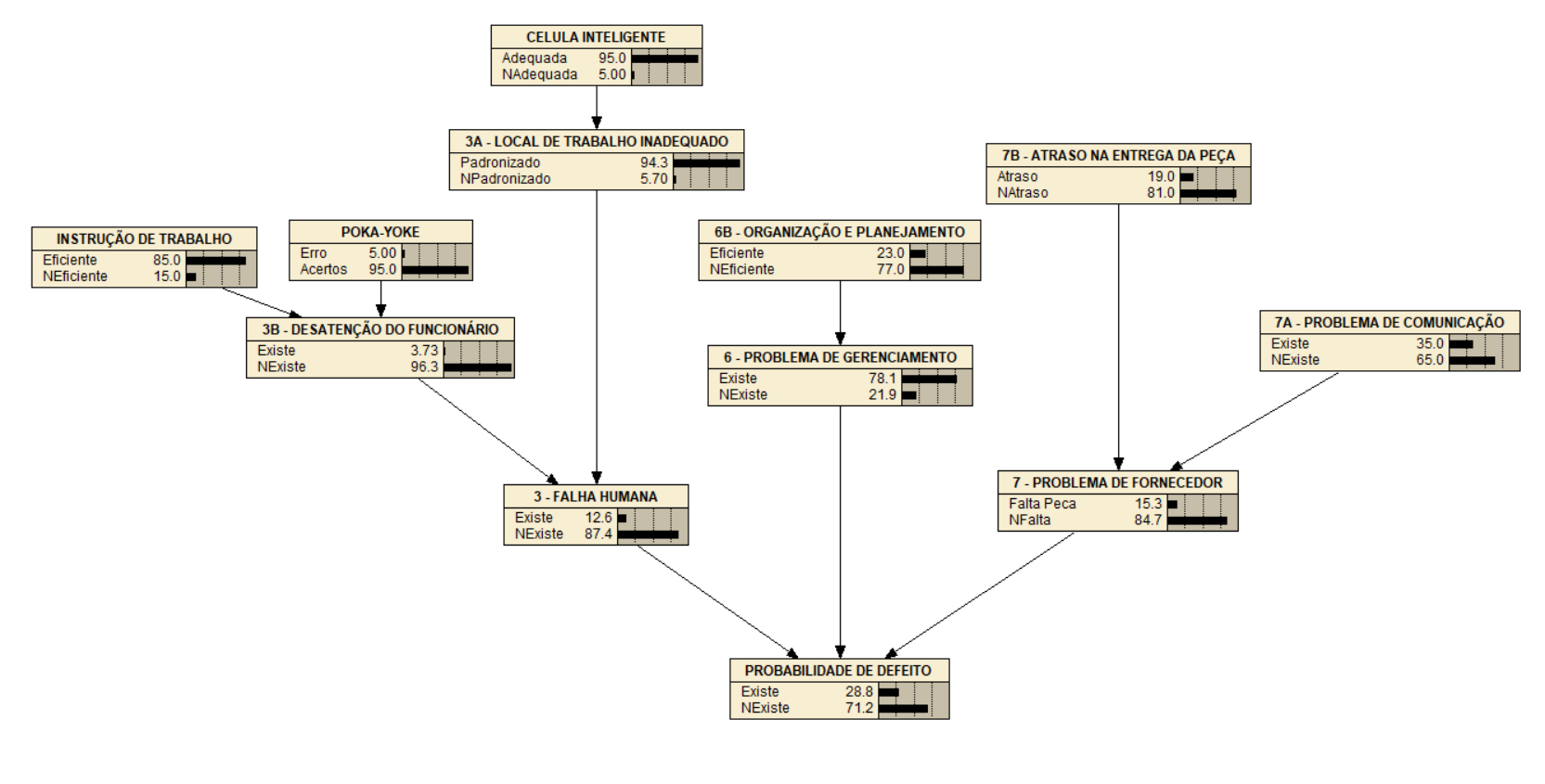
* 1. **REDE BAYESIANA DO SISTEMA**

Aoanalisar a rede construída, é possíveltraçar um caminhocrítico que leva aosnós que maisinfluenciam a probabilidade de defeitos. São eles do grupo 3 – Falha Humana e dos subgrupos 3A – Local Inadequado de trabalho e 3B – Desatenção.

Como propostas de melhoria de processoforamsugeridos 3 novosnós: um para atenuar o nó 3A e outrasduasopões para minimizar o nó 3B. Tendo em vista aergonomia e saúdefísico mental do colaborador, foramfeitasalterações no layout da estação de trabalho. Segundo [14], é fundamental para o trabalho de péousentado que as medidasantropométricasestejam de acordo com o posto de trabalho. E conforme[15], serãomaisexigidas as articulaçõesquantomaisdistante o peso estiver do corpoaumentando as tensõessobreelas e osrespectivosmúsculos. Dessa forma, estáproposto que sejaimplementadoumacélula de trabalhointeligente para que o Local se torne 80% adequado para osprocessos.

Já, de acordo com o que é apresentado por [6], para o tange o problema da desatenção do funcionário, serãoaplicadasduasações: Instrução de trabalho e ferramentas a prova de erro, ou, emjaponês, *Poka-Yoke*. As soluções*Poka-Yoke*oferecem um processo com 96% de assertividade, se tornandouma forma extremamenteeficiente de controlar o processo. Todavia, nemtodososprocessos de montagempodem ser controladosoutemcondições de ser guiado por ferramentas dessetipo. O sugerido é que oproduto no seuestágiomaisinicial, aindadurante a realização do DFMEA sejacapaz de levantar as possíveisimplicações do design do produto para osprocessos de montagem e nascondições de segurança e ergonomia, além dos acessos e layouts de montagem. Já a instrução de trabalho, conforme o modelodescrito por [16] e antes por [17], é um documentoresponsável por descrever o “O QUE?” e o “ONDE?” Montar dentro de umasequêncialógica e dividida por postos/montadores de montagem. Nelavão as informaçõesnecessárias para que omontadorsejacapaz de realizarsuastarefas de forma saudável e dentro do *tempo-takt*disponível.

Na Figura 7 está a nova rede com as açõesimplementadas. Agora é possívelver que a probabilidade de ocorrer um defeitoemumamáquinacaiu de 83,6% para 28,8%, gerando um delta 54,8% apósaimplementação das ações no modeloteórico.



**Fig 7** – Rede Bayesianaatualizada com melhoriaspropostas.

1. **CONCLUSÃO**

Inseridosem um modelo de economiacapitalista e cadavezmaisglobalizada, as indústriasem todo o redor do mundobuscammaneiras de reduzirseus custos operacionaisem via de aumentarsuasmargens de lucro e gerarprogressonosnegócios. Desdeosmodelos de produçãoemmassa no início do século XX até a manufaturaenxuta do final do séculopassado, pesquisadores e gestores, buscamformas de viabilizaressetãoalmejadoobjetivo.

O FMEA e tanto quantoeles, as redes Bayesianas, sãoemsuma ferramentas que temcomoobjetivofim, diretoouindireto, de possibilitarumadiminuição de riscos, sejameles de segurançaou de defeito, o que gerammenosqualidade no produtoentregueaocliente, e emqualqueruma das situações, custos a marca. Sendoassim, métodoseficazes para mapear, representar e controlarprocessosfabris.

No presentetrabalhoforamaplicadasem conjunto ambas as ferramentas emumaindústriamultinacional do ramo de máquinas e equipamentosagrícolas. Como método, utilizou-se o FMEA de processos para analisarponto a pontoosprocessos de montagem da linha de montagem principal quantoseusíndices de Severidade, Ocorrência e Detecção. Determinadososvalores dos índices e o cálculo do RPN, foramtambémcalculadas as probabilidades de cada um dos modos de falhacompreendidosnaanálise. Com esses dados emmãos, foiconstruídouma rede Bayesiana, ondefoipossíveldescrever o estadoatual do processo.

Por fim, baseadonaanálise da rede Bayesiana, traçamos um caminhocrítico que nosapontou para o problemamais grave e influentenageração de defeitos: o ramo de nóreferente a desatenção dos funcionários. Usandooutrasliteraturascomoreferências, aplicamosalgunsmétodos de gestão de processos que nospossibilitaramdiminuiremaproximadamente 55% a probabilidade de defeitos no modeloteórico.   
 Futuramente, pretendemosavaliar a fidelidade do modeloteóricodescrito pela rede Bayesiana, confrontandoosresultadosapósaplicaçãoprática das metodologias de gestão no processofabril. Desta forma, podemosconcluir a veracidade e aeficácia do modelo de integração das duas ferramentas como ferramenta de auxílionatomada de decisãonaindústria.

1. **REFERÊNCIAS:**

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | N. O. Bahrin MF Mak, “Industry 4.0: A Review on Industrial Automation and Robotic,” *Jurnal Teknologi,* p. 137–143, 2016. |
| [2] | A. S. a. P. A. C. Miguel, “Failure mode and effects analysis (FMEA) in the context of risk management in new product development,” *International Journal of Quality & Reliability Management,* vol. 25, pp. 899-912, 2008. |
| [3] | J. Gámez, S. Moral e A. S. Cerdan, “Advances in bayesian networks, Studies in Fuzziness and Soft Computing,” nº Springer Berlin Heidelberg, 2013. |
| [4] | G. &. A. İ. &. A. S. &. F. G. E. Nilay Yücenur, “Integrating Fuzzy Prioritization Method and FMEA in the Operational Processes of an Automotive Company,” *International Journal of Knowledge-Based Organizations,* 2019. |
| [5] | M. J. Rezaee, S. Yousefi, M. Valipour e M. M. Dehdar, “Risk analysis of sequential processes in food industry integrating multi-stage fuzzy cognitive map and process failure mode and effects analysis,” *Computers & Industrial Engineering,* vol. 123, pp. 325-337, 2018. |
| [6] | M. Kostina, “Reliability Assessment of Manufacturing Processes,” *International Journal of Industrial Engineering and Management,* pp. 143-151, 2012. |
| [7] | W. E. MOORE, O impacto da indústria: modernização de sociedades tradicionais, Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1968, p. 145. |
| [8] | D. KUPFER e L. HASENCLEVER, *Economia industrial: fundamentos teóricos e práticas no Brasil,* Campus: Ed. Rio de Janeiro, 2002. |
| [9] | G. Pinto, “A INDÚSTRIA E SEUS IMPACTOS E PERSPECTIVAS NO DESENVOLVIMENTO DO MUNICÍPIO DE CRUZ ALTA-RS,” 2003. |
| [10] | SAE INTERNATIONAL, SAE J1739, 2009. |
| [11] | S. MAHADEVAN, “Bayesian networks for system reliability reassessment,” *Struct. Saf. 23,* pp. 231-251, 2001. |
| [12] | N. FENTON, “Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks,” *Chapman & Hall/CRC,* p. 660, 2018. |
| [13] | S. MAHADEVAN, “Performance Evaluation of a Manufacturing Process under Uncertainty using Bayesian Networks,” *Journal of Cleaner Production,* p. 113, 2015. |
| [14] | E. GRANDJEAN, Manual de ergonomia: adaptando o trabalho ao homem, Porto Alegre: Bookman, 1998, p. 45. |
| [15] | J. DUL e B. WEERDMEESTER, Ergonomia prática, São Paulo: Edgard Blucher, 1995, p. 18. |
| [16] | T. OHNO, Gestão do posto de trabalho, Porto Alegre: Bookman, 2015. |
| [17] | J. WOMACK, D. JONES e D. ROOS, A Máquina que Mudou o Mundo, Rio de Janeiro: Editora Campus Ltda, 1992. |