

APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY PARA CONTROLE DA QUALIDADE

Raphael S. Carneiro, Nadia Nedjah, Luiza de Macedo Mourelle

*Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações,
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rua São Francisco Xavier 524, Maracanã, Rio de Janeiro – RJ, Brasil*

Palavras Chave: Qualidade, Inspeção, Lógica Fuzzy, Regras Fuzzy.

Resumo. Este artigo expõe a necessidade de uma padronização na inspeção de produtos manufaturados. Estabelecer padrões quando a decisão está nas mãos de um inspetor humano não é uma tarefa simples. Ao longo do texto é proposta a aplicação da lógica fuzzy para apóio à tomada de decisão nos casos onde há dúvida entre os inspetores sobre a avaliação qualitativa dos produtos. São realizados estudos aplicando a lógica fuzzy para três produtos diferentes do mercado de componentes elétricos, para os quais foram estabelecidas variáveis fuzzy de entrada e regras para combinar estas variáveis gerando uma saída que representa a situação final do produto.

1 INTRODUÇÃO

Produtos manufaturados requerem uma análise qualitativa antes de seu envio aos clientes, uma vez que sua aplicabilidade final precisa ser assegurada. É comum observar em fábricas do mundo inteiro a prática de inspeções volantes que se estendem, em geral, ao longo das linhas produtivas. Essa prática busca o seguimento das especificações estabelecidas em normas ou pelos clientes finais e é realizada por pessoal qualificado e com conhecimento sobre o produto [4].

Este estudo se concentrará em alguns produtos específicos do mercado elétrico, embora seja aplicável a qualquer tipo de análise qualitativa para produtos manufaturados.

A análise da qualidade de componentes acionadores e sinalizadores utilizados em painéis elétricos não difere, em sua essência, das demais análises manuais e visuais realizadas por inspetores [3]. Os acionadores têm funcionamento meramente mecânico, operando para ligar e desligar sistemas das mais diversas aplicações utilizando unidades de contato que são responsáveis pela condução de correntes elétricas. Já os sinaleiros, ou lâmpadas indicativas para painéis elétricos, têm função de mostrar ao usuário a situação dos sistemas operados e gerenciados pelo painel. Descrevendo de forma resumida a estrutura de liberação de materiais em uma fábrica, temos o departamento de produção, o qual se concentra na fabricação o produto, e o departamento da qualidade, que se concentra em verificar se o que foi fabricado atende ou não às especificações normativas.

Embora haja uma crescente absorção das tecnologias de automação nas fábricas do século XXI, muitas das inspeções pela qualidade ainda são realizadas pelos olhos e mãos de inspetores humanos qualificados. Buscar a padronização é uma das funções destes inspetores.

Porém, devido a questões humanas, padronizar pode se tornar uma tarefa consideravelmente difícil, uma vez que funcionários humanos estão sujeitos à variações, que muitas vezes são abstratas, de acordo com interferências externas, como distrações, questões emocionais, conhecimento, experiência, insatisfações e etc. Tais variações acabam por elevar o risco de liberação de produtos defeituosos, assim como à reprovação de itens que atendam às especificações básicas e que são aceitáveis para determinados clientes. Ambas as situações geram custo excessivos e desnecessários para uma organização. Aprovar um produto que não atende às especificações significa que o cliente final receberá algo que não atende às suas expectativas, gerando, dentre outras coisas, devoluções, insatisfação do cliente e perda de mercado. Por outro lado, a reprovação de produtos que atendam parcialmente às especificações, pode gerar, desnecessariamente, retrabalhos, horas extras, sucata e um custo de não-conformidade que poderá exceder ao objetivo da organização.

Outra questão importante a ser considerada, é a experiência do inspetor da qualidade. Esta característica se mostra crucial para efetuação de análises qualitativas que dependem do fator humano. Uma vez que inspetores experientes estão sujeitos à deixarem de fazer parte do quadro de funcionários de uma organização, os líderes desta passam a estar sujeitos à contratação de novos inspetores, o que pode ou não prejudicar o processo de inspeção, logo prejudicar ou não o cliente final. Buscar a padronização e o auxílio à tomada de decisões significa aprimorar os processos fabris em busca da melhoria contínua. Como ferramenta importante neste contexto, podemos utilizar lógicas matemáticas e computacionais que operam como palavra decisiva em caso de disparidade entre inspetores ou ainda em casos de dúvida entre os mesmos.

O restante deste artigo é dividido em três seções: na Seção 2 será dada uma introdução à lógica fuzzy e sua aplicação no processo de controle de qualidade de produtos comerciais; na Seção 3 serão explicados os detalhes técnicos dos produtos controlados que serão usados na modelagem fuzzy detalhada na Seção 4, juntamente com os resultados obtidos.

2 A LÓGICA FUZZY E SUA APLICAÇÃO NO CONTROLE DA QUALIDADE

Uma lógica matemática muito conhecida nos processos de auxílio à tomada de decisão é a lógica fuzzy [1]. Também chamada de nebulosa ou difusa, esta lógica tem como base a análise de dados não digitalizados, ou seja, considera valores intermediários entre o máximo (“um” na lógica Booleana) e mínimo (“zero” na lógica Booleana). Analisar dados utilizando tal lógica significa considerar os estágios compreendidos entre os extremos de determinadas entradas para que através da inferência de seus valores, chegue-se à uma ou mais saídas também com valores não digitais. A partir de regras, normalmente estabelecidas por especialistas no processo a ser analisado, pode-se mapear o comportamento do sistema.

Sintetizando o sentido da lógica em questão, ilustrativamente, podemos considerar o andamento da composição de uma obra musical. Para a lógica digital existem somente dois estágios, o “zero”, onde a obra ainda não foi iniciada e o “um”, onde a obra está finalizada, não contemplando todo o processo. Já para a lógica fuzzy, todos os momentos da composição são considerados. Podemos dividir o processo de criação desta obra ilustrativa em “obra iniciada”, “obra em andamento”, “obra próxima ao fim” e “obra finalizada”, estas etapas definidas de forma não absoluta podem representar o conceito de variável lingüística utilizada nesta lógica.

Descrevendo matematicamente, todos os infinitos valores entre “zero” e “um” participam para gerar uma saída mais próxima da realidade de acordo com as regras estabelecidas.

O raciocínio humano também agrupa o conhecimento de forma abstrata. Quando consideramos uma situação e buscamos uma solução ou conclusão, analisamos um número grande de variáveis, estas percebidas pelos nossos sentidos, e regras, que são pré-estabelecidas pelo nosso conhecimento e experiência.

Este tipo de análise de dados atende às necessidades do controle da qualidade em questão, uma vez que não é desejável que tenhamos apenas produtos aprovados ou reprovados, mas sim todos os níveis de qualidade aceitáveis para clientes e normas [3]. A Figura 1 resume o processamento do conhecimento fuzzy [2].

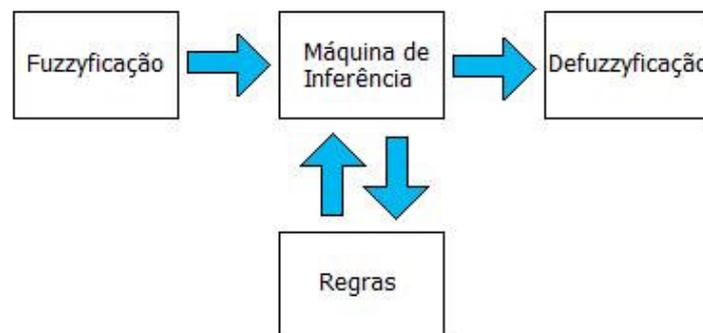


Figura 1: Modelo Fuzzy

Neste diagrama, a fuzzificação representa a conversão da variável escalar para fuzzy e a defuzzificação o contrário [1]. A máquina de inferência interage com o banco de regras considerando as entradas para gerar as saídas. Para este estudo foi escolhida a máquina de inferência baseada no modelo Mandani [1].

3 PRODUTOS E ESPECIFICAÇÕES

Consideraremos três grupos de produtos diferentes para esta análise. Dois tipos de botões muito populares na fabricação de painéis elétricos e um tipo de sinalizador também com grande aceitação neste mercado.

3.1 Botões Giratórios

Este primeiro grupo de produtos consiste em acionadores que necessitam de uma força perpendicular ao painel para que o sistema seja acionado e de um toque aplicado no sentido horário para que o mesmo retorne a posição inicial, desligando o sistema. A Figura 2 ilustra o componente e sua aplicação.

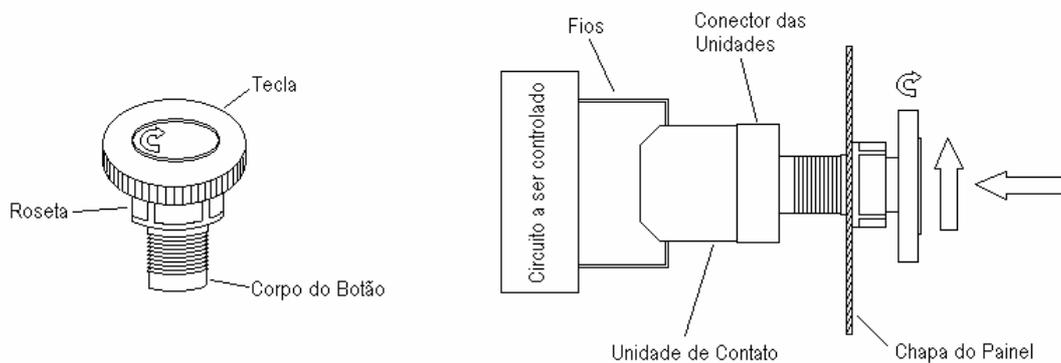


Figura 2: Botões giratórios e sua aplicação

Os botões giratórios utilizam como estrutura básica um corpo, plástico ou metálico, que aloja uma mola de torção, um acionador plástico e travas movimentadas por uma mola de compressão; uma roseta, responsável por conter este conjunto dentro do corpo e uma tecla com ranhuras nas bordas para facilitar a aplicação do torque pelo usuário, esta tecla, em geral, possui o desenho de uma seta indicando o sentido de desligamento do sistema.

Uma vez que os testes aplicáveis às unidades de contato são realizados por máquinas visando assegurar o cumprimento das especificações elétricas estabelecidas em normas, nos deteremos aos testes aplicáveis ao botão, que são realizados pelo inspetor da qualidade [4].

3.2 Botões Travantes

Estes botões também têm como função básica o acionamento de sistemas elétricos. Seu funcionamento consiste na aplicação de uma força perpendicular ao painel para acionamento e outra força na mesma direção, porém em sentido contrário, para desligamento do sistema. A diferença entre este grupo de produtos e o grupo de botões pulsadores pode ser percebida facilmente, este último não precisa da aplicação de uma força para o desligamento do sistema. A Figura 3 ilustra o componente e sua aplicação.

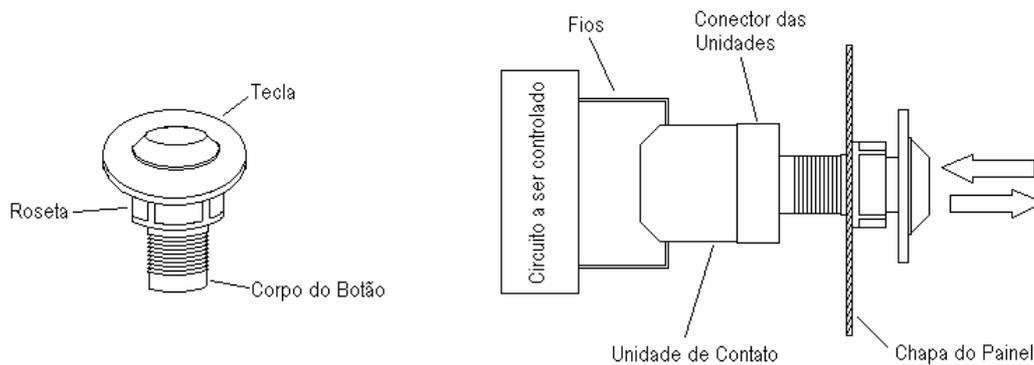


Figura 3: Botões travantes e sua aplicação

Os botões travantes são montados a partir de um corpo, plástico ou metálico, que aloja uma mola de compressão, um acionado plástico e uma mola em formato anel para travar o botão na posição correta; uma roseta, responsável por conter este conjunto dentro do corpo e uma tecla que servirá para que o usuário pressione para acionar e puxe para desligar. Assim como no caso dos botões giratórios, não consideraremos a inspeção das unidades de contato.

3.3 Sinaleiros

Diferentemente dos grupos dos botões, estes produtos não são utilizados como entradas para sistemas elétricos, mas sim, como indicadores de processos, mostram as saídas. Este grupo não possui unidades de contato, uma vez que não tem como aplicação o acionamento de sistemas. Como em uma lâmpada comum os terminais de entrada deste dispositivo são alimentados com a tensão adequada para seu funcionamento. Um conjunto de cores muitas variadas é oferecido neste mercado para auxiliar na diferenciação de processos e status de sistemas. A Figura 4 ilustra o componente e sua aplicação.

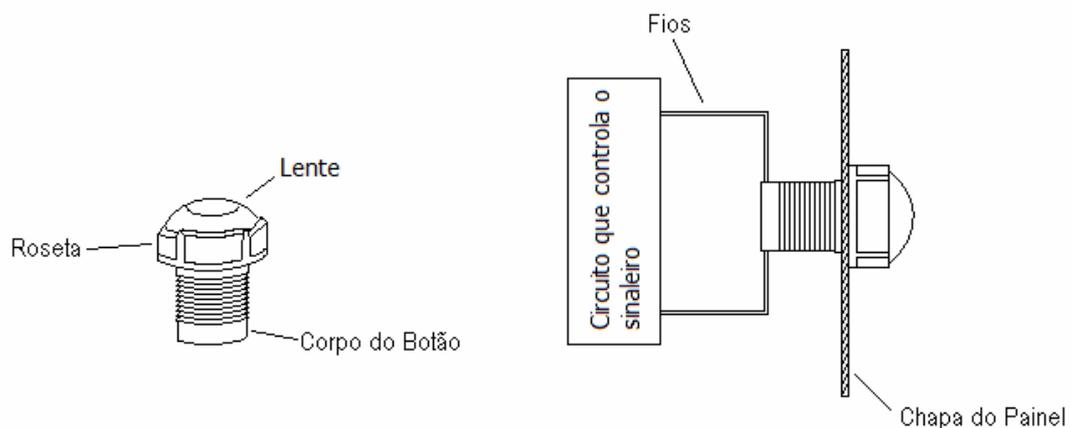


Figura 4: Sinaleiros e sua aplicação

Este tipo de sinaleiro consiste basicamente em um corpo, que pode ser plástico ou metálico, onde estará alojada toda a eletrônica referente ao funcionamento dos LEDs; em uma lente, que é fabricada em material plástico e tem como função propagar a luz na forma especificada pelo cliente e na cor correta; e uma roseta, que consiste em um aro plástico ou metálico que tem como função a fixação da lente no conjunto.

4 MODELAGEM FUZZY

Nesta etapa se fez necessária a participação de especialistas nos produtos a serem analisados. Foram consultados inspetores da qualidade e gerentes da qualidade e marketing a fim de chegar aos parâmetros de entrada e saída para composição dos conjuntos fuzzy [1, 2].

Para cada produto foram estabelecidos os principais fatores que devem ser observados pelos inspetores para a avaliação qualitativa. Estes fatores foram considerados como entradas do sistema e foram subdivididos em conjuntos fuzzy. Para a saída foi considerada a decisão a ser tomada pelo inspetor, ou seja, a situação do produto variando entre aprovado e reprovado.

Para os três estudos foram escolhidas as entradas, as saídas, desenvolvidas as tabelas verdade em conjunto com os especialistas, a partir destas tabelas foram desenvolvidas as regras, resultando em gráficos que mostram a interação entre entradas e saídas.

4.1 Botões Giratórios

Considerando o modelo básico para um sistema orientado pela lógica fuzzy aplicado aos botões giratórios, foi estruturado o diagrama da Figura 5 que mostra as entradas pertinentes aos fatores a serem avaliados pelo inspetor, a máquina de inferência fuzzy e a saída que mostra a situação do produto.

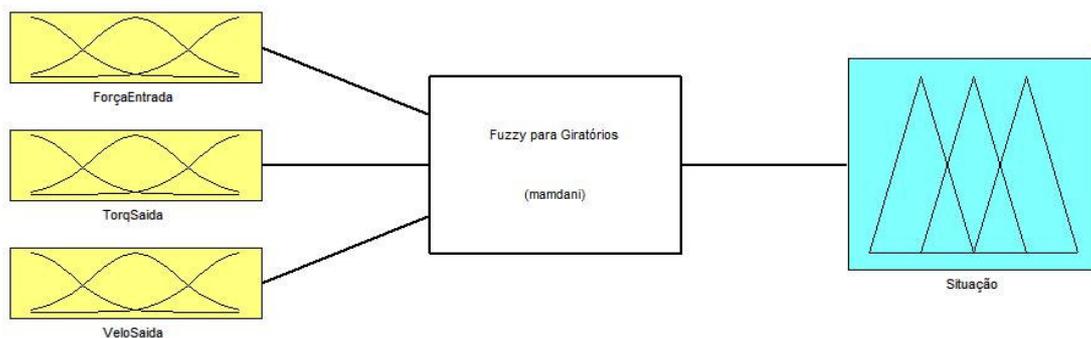


Figura 5: Modelo fuzzy para botões giratórios

A pesquisa realizada com os especialistas resultou nos seguintes parâmetros que devem ser considerados na inspeção da qualidade:

- Força de Entrada (*ForçaEntrada*) que representa a força necessária para acionar o botão perpendicularmente;
- Torque de Saída (*TorqSaída*) que representa o torque necessário para fazer o botão retornar à posição inicial;
- Velocidade de Saída (*Velocidade*) que consiste na velocidade em que o botão volta à sua posição inicial após o torque aplicado.

Estes parâmetros serão considerados como entradas para o sistema fuzzy e subdivididos em conjuntos fuzzy.

Para o caso da variável *ForçaEntrada*, foram levados em consideração três conjuntos, partindo da ausência de força até a força excessiva como mostrado na Figura 6. Esta variável é considerada, pois mede a força que o usuário precisará desempenhar para acionar o produto, esta força não poderá ser muito elevada para o botão seja considerado aprovado. É a partir desta força que os contatos das unidades de contato são acionados e iniciam a condução de

corrente elétrica, ligando assim o sistema controlado.

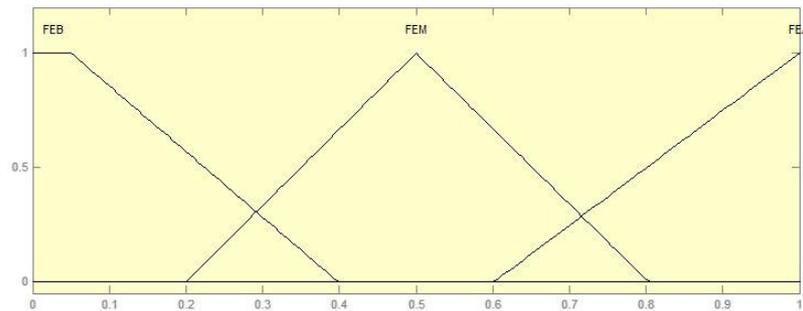


Figura 6: Força de Entrada

Os conjuntos fuzzy para esta entrada são os seguintes: (i) FEB – Força de Entrada Baixa; (ii) FEM – Força de Entrada Média; e (iii) FEA – Força de Entrada Alta.

As funções triangulares e trapezoidais foram escolhidas de acordo com a natureza de cada variável. Para a força de entrada, por exemplo, podemos ver uma função triangular entre funções trapezoidais, o que significa que nos dois pontos extremos da faixa temos constantes que mostram que a partir de determinados pontos teremos forças com valores iguais a zero ou ao maior valor aplicável para a capacidade humana. Como poderá ser percebido, para as demais variáveis as funções foram escolhidas de forma análoga.

A variável *TorqSaída* teve sua faixa estabelecida em quatro conjuntos fuzzy, um conjunto a mais que a variável anterior, isso se deve ao fato de haver maior divergência entre inspetores quando a variável torque está em questão. Quanto maior o número de conjuntos, melhor será a análise e mais regras poderão ser consideradas. Esta variável foi estruturada levando em consideração valores desde o torque nulo até valores de torque muito altos. Os conjuntos podem ser vistos na Figura 7 abaixo.

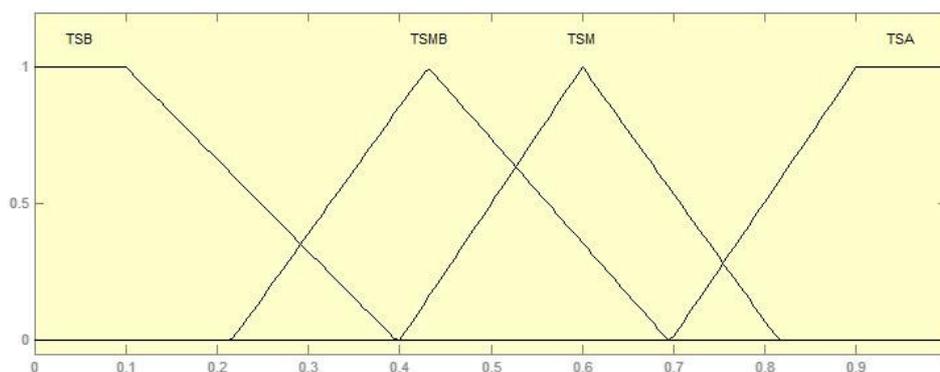


Figura 7: Torque de Saída

Este torque precisa ser considerado, pois somente ao final do giro do botão é iniciado o movimento de separação dos contatos que conduzem corrente elétrica e realizado o desligamento do sistema controlado por este produto. O *TorqSaída* foi dividido nos seguintes conjuntos: (i) TSB – Torque de Saída Baixo; (ii) TSMB – Torque de Saída Médio-Baixo; (iii) TSM – Torque de Saída Médio-Alto; e (iv) TSA – Torque de Saída Alto.

A terceira variável de entrada, *Velocidade* é de muita importância para o atendimento de

um requisito básico para botões giratórios, esta velocidade quando muito baixa tende a permitir a formação de arco voltaico entre os contatos das unidades, o que acaba por queimá-los ou reduzir sua vida útil. Para esta variável, seguindo exemplo do *TorqSaída*, também foram escolhidos quatro conjuntos fuzzy. Os conjuntos fuzzy para a variável *Velocidade* são: (i) VB – Velocidade Baixa; (ii) VMB – Velocidade Média-Baixa; (iii) VM – Velocidade Média; e (iv) VA – Velocidade Alta, conforme mostra a Figura 8.

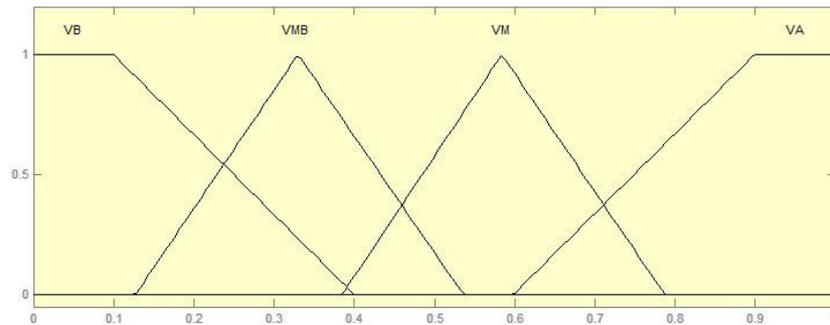


Figura 8: Velocidade de Saída

Considerando agora a saída do sistema fuzzy, foi realizada uma segunda pesquisa com os gerentes da qualidade e de marketing resultando nas possíveis situações de aprovação dos produtos. Estes especialistas levaram em consideração a criticidade do cumprimento de especificações e nível de exigência dos clientes. Foram levantadas quatro possíveis situações:

- *Aprovado1* que representa a situação em que o produto supera as especificações;
- *Aprovado2* que representa a situação em que o produto atende às especificações;
- *Aprovado3* que representa a situação em que o produto atende parcialmente às especificações apresentando falhas não críticas (atende pelo menos às características especiais);
- *Reprovado* que representa a situação em que o produto não atende às especificações críticas (não atender às características especiais).

Estas quatro possíveis situações são os conjuntos fuzzy para a saída. A partir destes conjuntos, podemos classificar também a criticidade da aplicação do produto ou o nível de exigência dos clientes, conforme mostra a Figura 9.

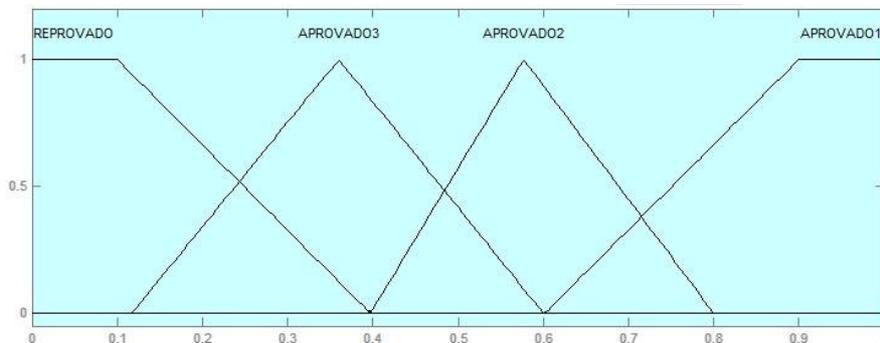


Figura 9: Situação do Produto - Saída

Fabricar produtos para o nível *Aprovado1* pode representar um custo excessivo para uma

organização, sendo em muitos casos desnecessário e muitas vezes irrelevante para o cliente. Fabricar para nível *Aprovado2* significa que a organização poderá fornecer estes produtos para todos os clientes e que os mesmos atendem à todas normas aplicáveis [4]. O nível *Aprovado3* significa que nem todas as especificações estão sendo atendidas, porém as características consideradas críticas estão de acordo com as especificações. Os produtos que forem classificados neste nível podem ser fornecidos para determinados clientes e aplicações que não demandem um completo atendimento normativo. Em geral, podem ser vendidos para aplicações que não sejam consideradas de segurança onde a vida pode ser posta em risco. A classificação do produto como *Reprovado* significa que algum requisito, ou combinação de requisitos críticos não foi atendida, ou seja, produtos com esta classificação não podem ser fornecidos a nenhum dos clientes e devem ser retrabalhados ou descartados.

As regras de interação entre as entradas foram levantadas utilizando o formato de tabela verdade na qual foi atribuída uma situação para cada possível combinação de entradas. Esta tabela foi o passo inicial para inserir as regras que orientaram a máquina de inferência fuzzy. A Tabela 1 em anexo mostra as possíveis combinações das entradas para análise de botões giratórios. Foram geradas 48 regras a partir desta tabela, todas seguindo (1) e representados de forma gráfica na Figura 10.

$$\text{If (Entrada1 = X) and (Entrada2 = Y) and (Entrada3 = Z) Then (Saída = W).} \quad (1)$$

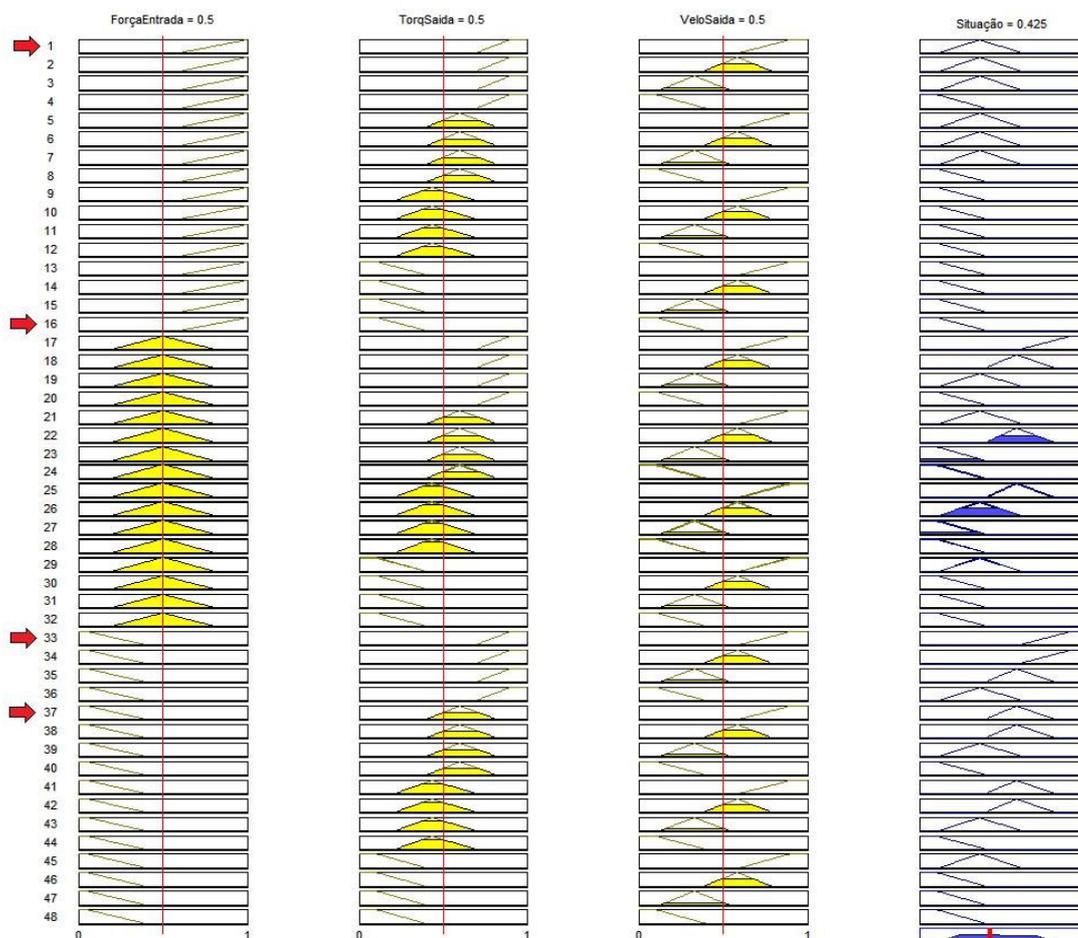


Figura 10: Regras Fuzzy para Botões Giratórios

As regras mostram a percepção dos especialistas sobre todas as combinações das entradas para gerar a saída. Foram selecionadas algumas regras para que sua participação na geração da saída sejam analisadas de forma mais aprofundada, estas estão marcadas com as setas, identificadas como regra 1, 16, 33 e 37.

A regra 1 em (2) mostra que para uma *ForçaEntrada* alta interagindo com a *Velocidade* e *TorqSaída* também altos temos a situação *Aprovado3*, ou seja, para o especialista, se o produto for capaz de responder de forma ideal em relação à velocidade e ao torque, mesmo que a força para acionamento seja alta, este produto pode ser fornecido para aplicações que não envolvam segurança. Os valores das variáveis para aplicação desta regra podem ser vistos na Figura 11.

$$\text{If } (ForçaEnt = FEA) \text{ and } (TorqSaída = TSA) \text{ and } (VelSaída = VA) \text{ Then } (Sit = AP3). \quad (2)$$

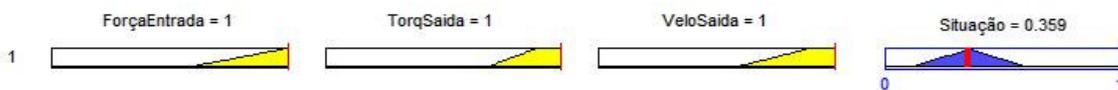


Figura 11: Regra 1 para botões giratórios

A regra 16 em (3) nos mostra a pior situação para o produto em questão, na qual todas as características de entrada encontram-se com valores extremos indesejáveis, ou seja, o usuário necessitará de muita força para acionar o botão, terá um torque muito baixo no retorno para a posição inicial e a velocidade de retorno será muito baixa. A situação proveniente desta combinação não poderia ser diferente de *Reprovado*. Podemos utilizar os valores da Figura 12 para exemplificar esta regra.

$$\text{If } (ForçaEnt = FEA) \text{ and } (TorqSaída = TSB) \text{ and } (VelSaída = VB) \text{ Then } (Sit = REP). \quad (3)$$

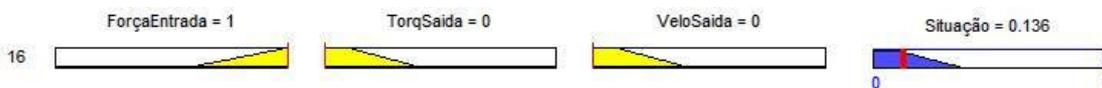


Figura 12: Regra 16 para botões giratórios

A regra 33 em (4) mostra o extremo oposto da regra 16, ou seja, a situação ideal de funcionamento para botões giratórios, onde a força para acionar o sistema é baixa e o torque de saída e a velocidade de saída são altos garantindo um retorno em tempo ideal à posição inicial após o giro do botão. Com esta combinação de entradas o produto supera as especificações e é classificado como *Aprovado1*. Para esta regra os valores são extremos, conforme mostra Figura 13..

$$\text{If } (ForçaEnt = FEB) \text{ and } (TorqSaída = TSA) \text{ and } (VelSaída = VA) \text{ Then } (Sit = AP1). \quad (4)$$

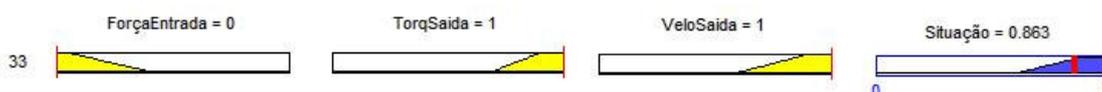


Figura 13: Regra 33 para botões giratórios

Como último exemplo para os botões giratórios, podemos observar a regra 37 em (5) que ilustrará a classificação faltante, a *Aprovado2*. Para esta regra temos que para o acionamento do botão o usuário precisará de pouca força e terá em resposta ao giro um toque mediano e uma velocidade alta. Para o especialista nesta situação o botão atende às expectativas e pode

ser vendido para qualquer cliente e aplicação. Na Figura 14, podemos ver os valores para o exemplo em questão.

$$\text{If (ForçaEnt = FEB) and (TorqSaída = TSM) and (VelSaída = VA) Then (Sit = AP2).} \quad (5)$$

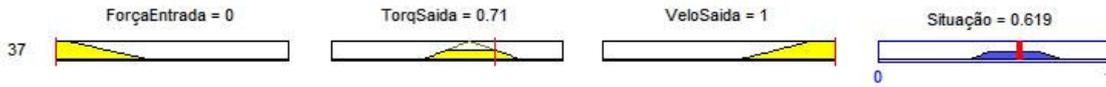


Figura 14: Regra 37 para botões giratórios

Os gráficos tridimensionais que mostram a interação entre as entradas para e sua participação para gerar a saída podem ser traçados. A interação entre as variáveis *ForçaEntrada* e *TorqSaída*, traçada na Figura 15, mostra claramente que quanto menor a força e maior o toque, melhor será a situação do produto final.

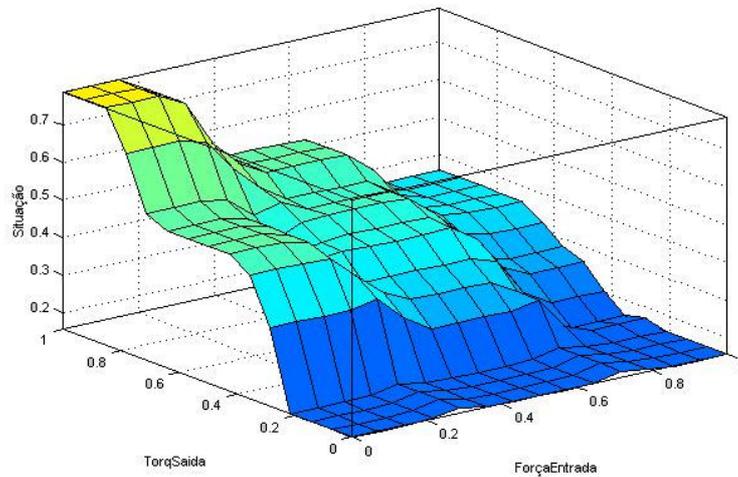


Figura 15: Gráfico Tridimensional mostrando a interação entre *ForçaEntrada* e *TorqSaída*

O gráfico da Figura 16 mostra que quanto menor for a força de entrada e maior a velocidade de saída melhor será a situação final.

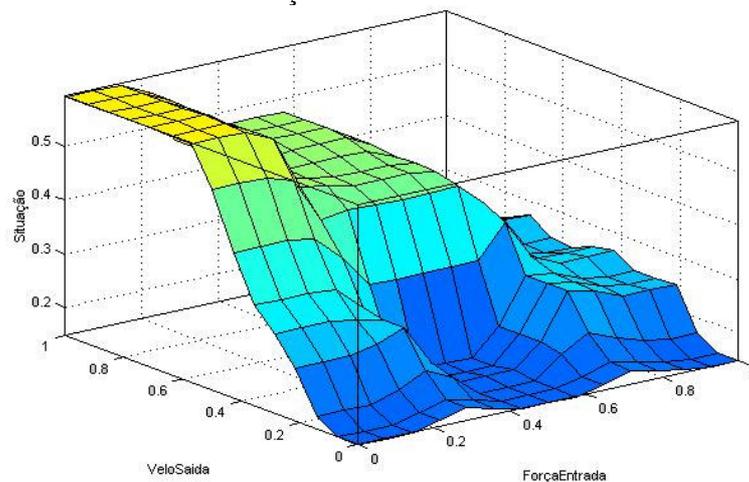


Figura 16: Gráfico Tridimensional para a interação entre *ForçaEntrada* e *Velocidade*

O gráfico da Figura 17 mostra a interação entre as variáveis *Velocidade* e *TorqSaída*. Observa-se o melhor valor de saída quando ambas as entradas apresentam valores altos.

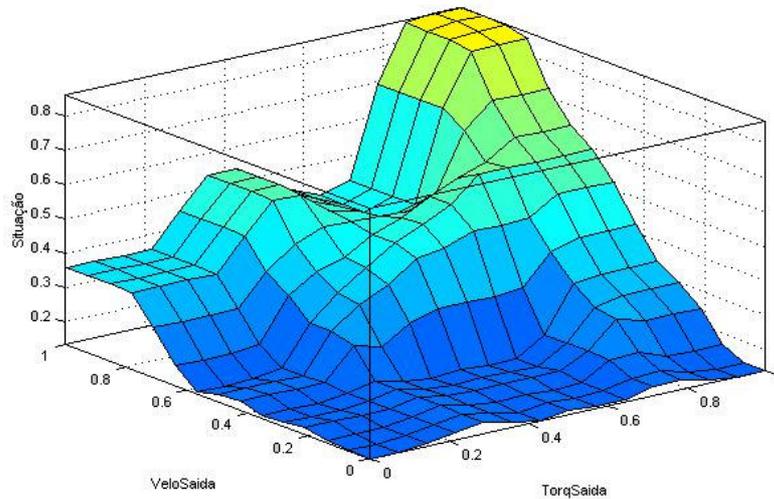


Figura 17: Gráfico Tridimensional para a interação entre *TorqSaída* e *Velocidade*

4.2 Botões Travantes

O modelo para os botões travantes é similar ao dos giratórios e a análise a ser realizada para este produto será a mesma realizada no item 4.1 deste estudo. Aplicando o modelo fuzzy básico para os botões travantes temos a figura 18.

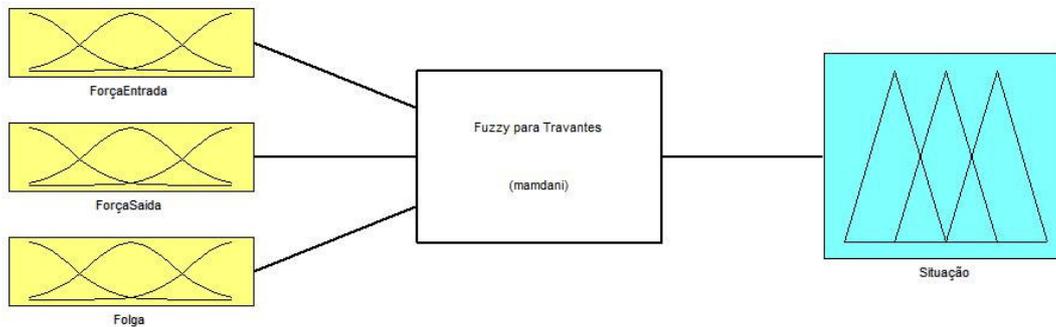


Figura 18: Modelo fuzzy para os botões travantes

O modelo acima mostra entradas diferentes das mostradas para os botões giratórios. Estas foram escolhidas de acordo com a aplicabilidade do produto que foi explicada no item 3.2. As entradas aplicáveis a este produto também foram especificadas pelos especialistas. Os parâmetros a serem considerados para a inspeção deste produto são:

- *ForçaEntrada* que representa a força aplicada perpendicularmente ao painel para acionar o botão;
- *ForçaSaída* que representa a força aplicada na mesma direção da força de entrada, porém em sentido oposto para desligamento do sistema;
- *Folga* que representa o deslocamento do frontal do botão sem que haja acionamento das unidades de contato.

A variável *ForçaEntrada* aplicada aos botões travantes deve ser considerada pelo mesmo motivo visto nos botões giratórios, pois é a força a ser aplicada pelo usuário para acionar o produto. Esta variável foi dividida em três conjuntos fuzzy, contemplando a faixa de força nula até a força máxima aplicável pelo inspetor.

Esta entrada foi dividida nos seguintes conjuntos, ilustrados na Figura 19: (i) FEB – Força de Entrada Baixa; (ii) FEM – Força de Entrada Média; e (iii) FEA – Força de Entrada Alta.

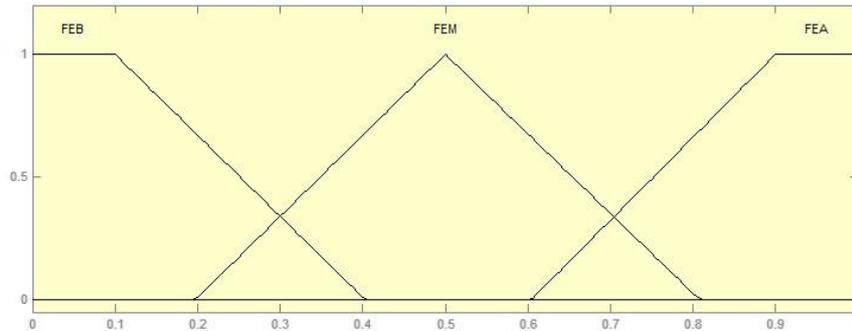


Figura 19: Força de Entrada

A variável *ForçaSaída* mede a força necessária para deslocar o botão de volta a sua posição inicial. Para o usuário significa a força necessária para desativar o sistema controlado pelo botão. Como no caso do botão giratório, esta variável também foi dividida em quatro conjuntos para aprofundar sua análise. Estes conjuntos estão compreendidos entre a força nula e a força excessiva, assim como à *ForçaEntrada*.

Os conjuntos considerados para a variável *ForçaSaída* são: (i) FSA – Força de Saída Alta; (ii) FSM – Força de Saída Média; (iii) FSMB – Força de Saída Média-Baixa; e (iv) FSB – Força de Saída Baixa, conforme mostra a Figura 20

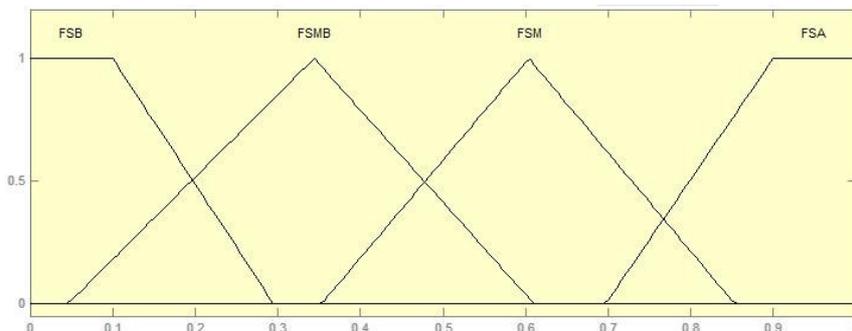


Figura 20: Força de Saída

A terceira variável de entrada é encarada pelos especialistas como um potencial defeito para este tipo de produto, a variável *Folga* representa o movimento feito pelo botão sem que as unidades de contato sejam afetadas, ou seja, caso haja uma folga excessiva, haverá uma faixa de deslocamento da tecla sem que o produto funcione. Esta característica é indesejável e é causada pelo incorreto posicionamento dos componentes internos do botão. Os conjuntos desta variável variam da ausência de folga até a folga máxima limite para o desmonte do produto.

A variável *Folga* foi dividida em quatro conjuntos: (i) FA – Folga Alta; (ii) FMA – Folga Média-Alta; (iii) FM – Folga Média; e (iv) FB – Folga Baixa, conforme mostra a Figura 21.

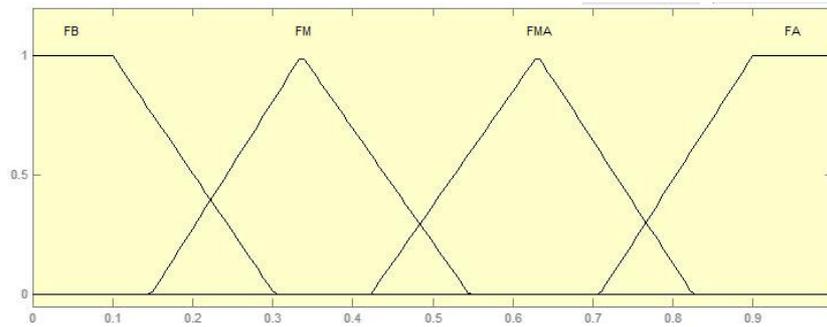


Figura 21: Folga

A análise da situação final da inspeção será, assim como no caso do botão giratório, a saída do sistema fuzzy e será realizada de forma idêntica à realizada no item 4.1. Para os botões travantes também foi montada uma tabela verdade com o auxílio dos especialistas. Esta tabela pode ser vista abaixo e sua estrutura é similar à da utilizada nos botões giratórios. Apartir da Tabela 2 no anexo, foram levantadas 48 regras de interação seguindo o mesmo formato da expressão (1).

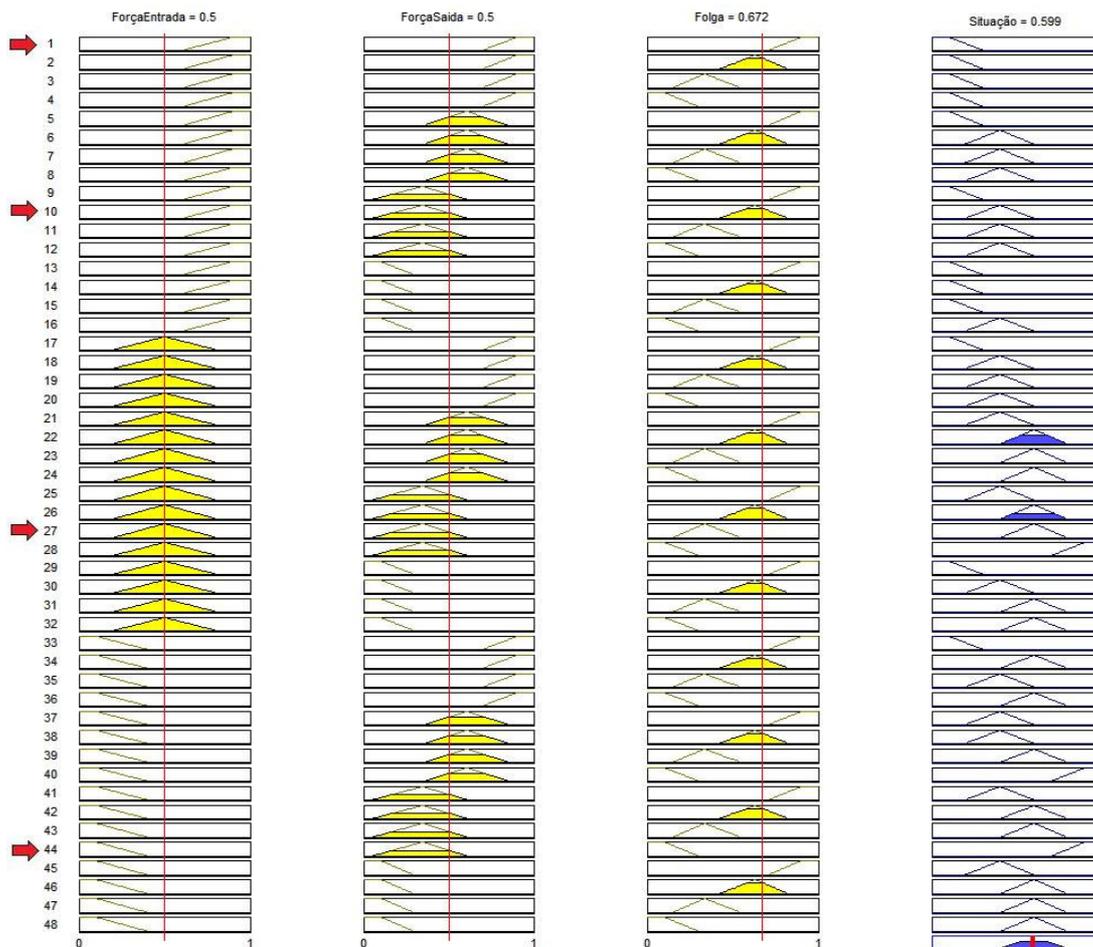


Figura 22: Regras Fuzzy para Botões Travantes

O formato gráfico das regras também pode ser adotado para os botões travantes, mostrado na Figura 22. Assim como realizado no item 4.1, foram escolhidas quatro regras para exemplificar as quatro possíveis situações de saída. Neste caso foram escolhidas as regras 1, 10, 27 e 44.

A regra 1 em (6) mostra a pior situação para esta classe de produtos, ou seja, a força de entrada, a força de saída e a folga com seus valores máximos. Neste caso, é exigido do usuário muita força tanto para acionar quanto para desligar o sistema e há um grande deslocamento do frontal do botão sem influencia nas unidades de contato. Neste caso a situação da saída é *Reprovado*. Como exemplo, esta regra mostra os valores da Figura 23.

$$\text{If (ForçaEnt = FEA) and (ForcSaida = FSA) and (Folga = FA) Then (Sit = REP).} \quad (6)$$

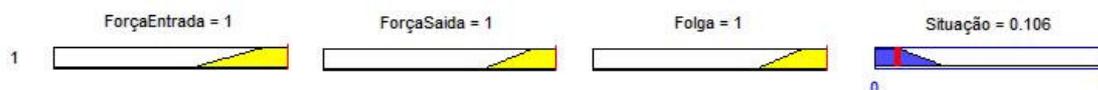


Figura 23: Regra 1 para botões travantes

No caso da regra 10 temos a situação de “Aprovado 3”, ou seja, este produto pode ser fornecido desde que não seja para aplicações de segurança. As entradas encontram-se em valores intermediários tendendo a valores inadequados. A “Força de Entrada” está alta e a “Folga” também está com valores elevados, porém a “Força de Saída” está com valores próximos ao ideal.

$$\text{If (ForçaEnt = FEA) and (ForcSaida = FSMB) and (Folga = FMA) Then (Sit = AP3).} \quad (7)$$

Graficamente os valores para a regra 10 podem ser vistos abaixo:

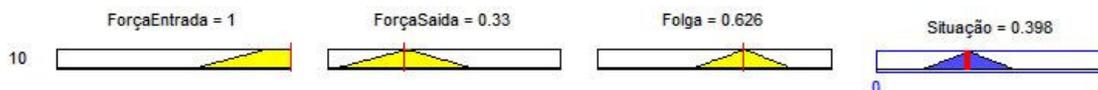


Figura 24: Regra 10 para botões travantes

Para a situação de “Aprovado 2” analisaremos a regra 27. Nesta regra podemos perceber que as variáveis estão tendendo a valores próximos do ideal no caso da “Força de Saída” e “Folga” e a valores médios no caso da “Força de Entrada”. Esta interação qualifica o produto para ser fornecido para qualquer aplicação.

$$\text{If (ForçaEnt = FEM) and (ForcSaida = FSMB) and (Folga = FM) Then (Sit = AP2).} \quad (8)$$

Podemos expressar esta regra pelos seguintes valores:



Figura 25: Regra 27 para botões travantes

A regra 44 mostra a melhor combinação possível para os botões travantes, onde a “Força de Entrada”, a “Força de Saída” e a “Folga” são mínimas, ou seja, a utilização do produto requer o mínimo de força e o deslocamento do frontal tem a menor perda de movimento devido à ausência de folga. Neste caso a situação final do produto é “Aprovado 1”.

If (ForçaEnt = FEB) and (ForcSaída = FSMB) and (Folga = FB) Then (Sit = API). (9)

Estes valores extremos podem ser percebidos no gráfico abaixo:

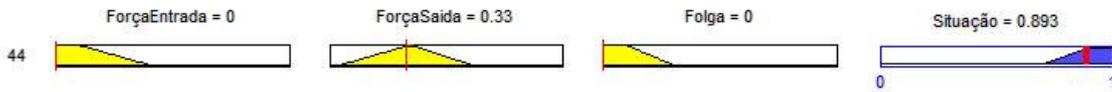


Figura 26: Regra 44 para botões travantes

Os gráficos tridimensionais para o estudo de botões travantes mostrarão a interação entre as três variáveis de entrada, assim como realizado no estudo dos botões giratórios.

O gráfico da Figura 27 mostra a interação entre as variáveis *ForçaEntrada* e *ForçaSaída*. Como podemos perceber quanto menores forem os valores de ambas as variáveis melhor será a situação do produto

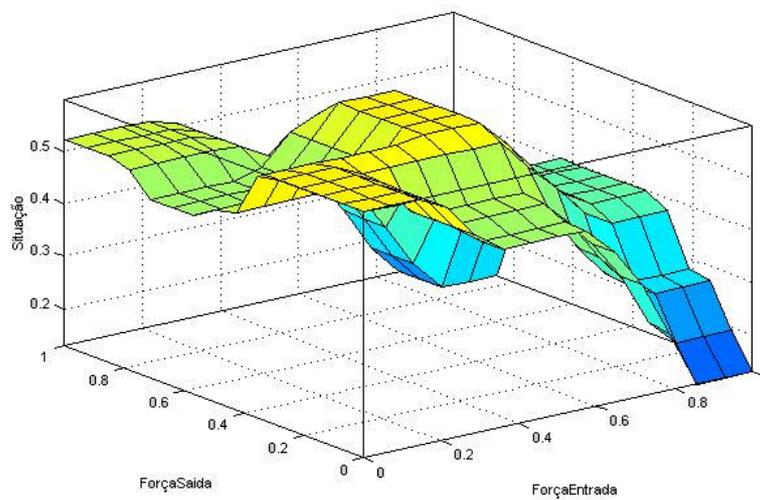


Figura 27: Gráfico Tridimensional para a interação entre “Força de Entrada” e “Força de Saída”

A interação entre *ForçaEntrada* e *Folga* pode ser vista no gráfico da Figura 28 que também mostra que quanto menores forem os valores destas variáveis melhor será a saída.

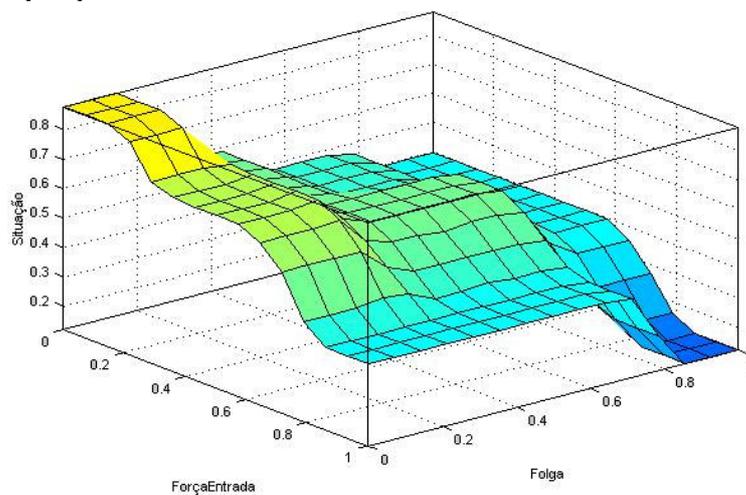


Figura 28: Gráfico Tridimensional para a interação entre *ForçaEntrada* e *Folga*

O gráfico da Figura 29 do estudo dos botões travantes mostra a interação entre as variáveis *ForçaSaída* e *Folga*. Assim como nos dois gráficos anteriores podemos perceber que os menores valores são desejáveis para obter a melhor saída possível.

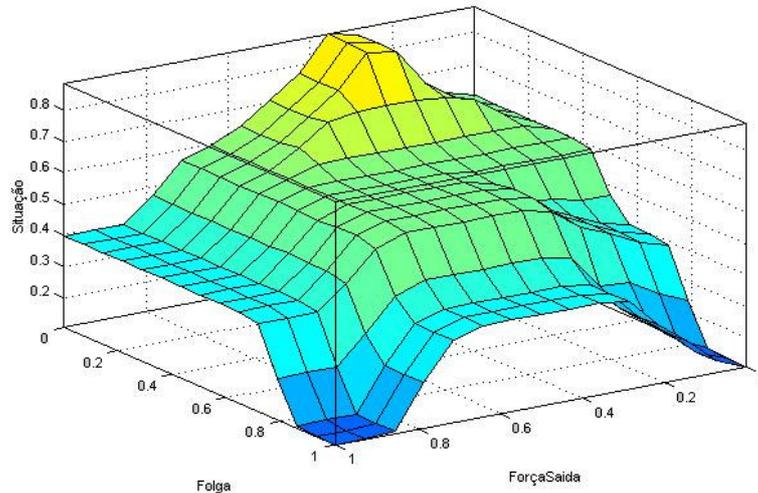


Figura 29: Gráfico Tridimensional para a interação entre *ForçaSaída* e *Folga*

4.3 Sinaleiros

A Figura 30 mostra o modelo fuzzy aplicado à classe de sinaleiros. Para esta análise foram consideradas apenas duas entradas. Estes parâmetros foram considerados pelos especialistas como preponderantes para o cumprimento das especificações. As variáveis de entrada para o sistema fuzzy são as seguintes:

- Cor que representa a cor especificada para o produto
- Luminosidade que representa a intensidade luminosa para o produto



Figura 30: Modelo fuzzy para sinaleiros

Como pode ser percebido, não será levado em consideração a funcionalidade elétrica do produto, uma vez que a aprovação desta função deve ser realizada por máquinas capazes e a decisão de aprovação desta característica não está nas mãos do inspetor.

A cor deve ser considerada na análise para que a correta tonalidade especificada pelo cliente seja atendida, para que sejam evitadas pequenas variações que são, na maioria das vezes, ocasionadas pelo processo de injeção termoplástica da lente. Os conjuntos foram

divididos de forma a compreender faixas de cores entre escuro e claro conforme podemos ver na Figura 31. A variável *Cor* foi dividida em cinco conjuntos fuzzy: (i) CFEC – Cor fora da especificação para clara; (ii) CEC – Cor especificada mais clara; (iii) CE – Cor especificada; (iv) CEE – Cor especificada mais escura; e (v) CFEE – Cor fora da especificação para escura

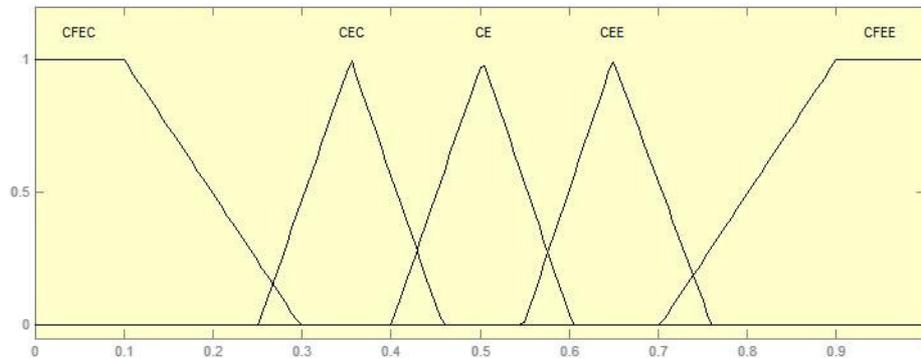


Figura 31: Cor

A segunda variável de entrada é referente à intensidade luminosa do sinaleiro. Controlar esta característica se faz necessário para evitar variações entre os produtos em relação à padrões de sinalização, percepção da indicação pelo usuário e também em relação à vida útil do produto, uma vez que se a intensidade luminosa estiver elevada devido à uma montagem elétrica interna incorreta, a vida útil da lâmpada poderá ser reduzida. Foi considerada uma faixa para os conjuntos que vai desde intensidades muito baixas até muito altas. Os conjuntos podem ser descritos como: (i) LMA – Luminosidade muito alta; (ii) LA – Luminosidade alta; (iii) LC – Luminosidade correta; (iv) LB – Luminosidade baixa; e (v) LMB – Luminosidade muito baixa, conforme Figura 32.

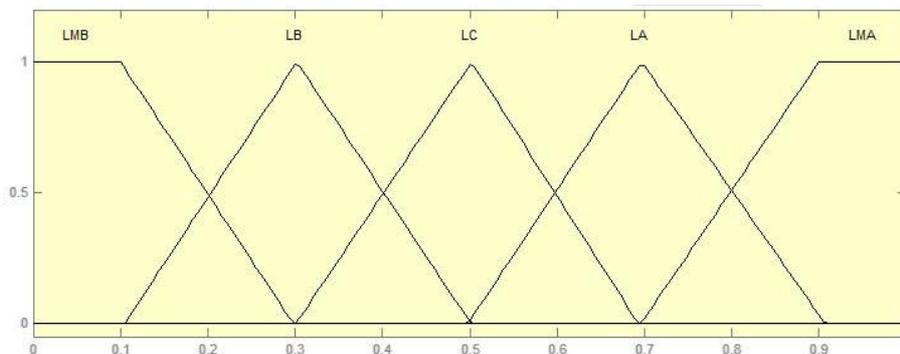


Figura 32: Luminosidade

Embora este produto apresente características muito diferentes dos botões, a saída a ser considerada para este estudo será a mesma, já que a variável utilizada até então atende às necessidades da análise. A Tabela 3 no anexo para sinaleiros originou 25 regras como podemos perceber na Figura 33. Com anteriormente, a forma de todas as regras obedece à expressão (1) e pode-se mostrar as regras dos sinaleiros em formato gráfico. Foram escolhidas quatro regras exemplificando as quatro possibilidades das situações de saída. Para uma análise mais aprofundada, foram escolhidas as regras 1, 7, 13 e 16.

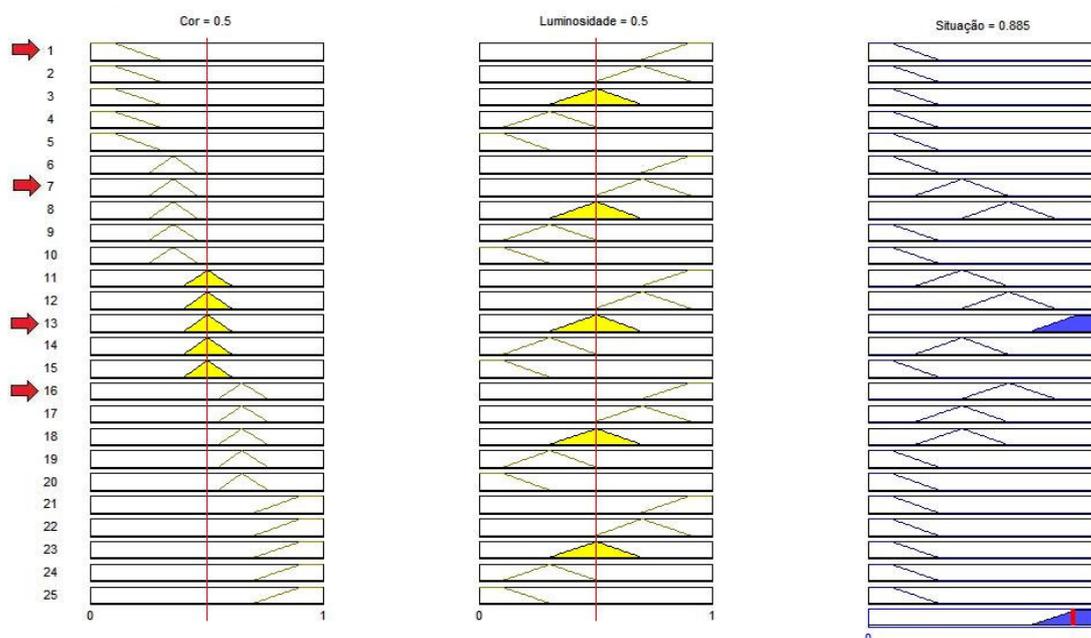


Figura 33: Regras Fuzzy para Sinaleiros

A regra 1 em (10) mostra uma das piores situações, onde o a intensidade luminosa está muito alta e a cor está fora das especificações. Nestas condições o produto não poderá ser fornecido para nenhuma aplicação, sendo assim, sua situação final é *Reprovado*. Valores exemplificando esta situação podem ser vistos na Figura 34

$$\text{If } (Cor = CFEC) \text{ and } (Luminosidade = LMA) \text{ Then } (Sit = REP). \quad (10)$$

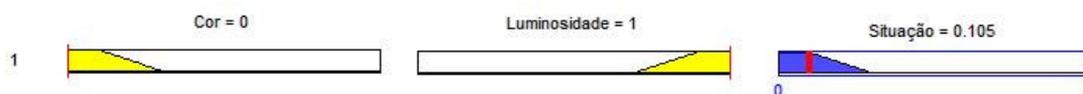


Figura 34: Regra 1 para botões sinaleiros

A regra 7 em (11) mostra o produto com luminosidade alta e com a cor dentro das especificações, porém clara. Para o especialista, esta combinação atende às especificações básicas e este produto deve ser classificado como *Aprovado3*. Como podemos ver na Figura 35, esta regra possui valores intermediários

$$\text{If } (Cor = CEC) \text{ and } (Luminosidade = LA) \text{ Then } (Sit = AP3). \quad (11)$$

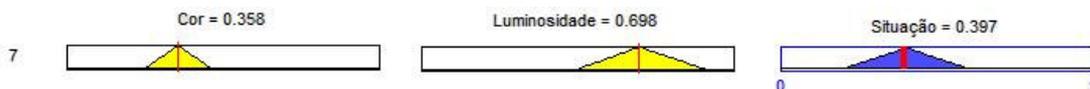


Figura 35: Regra 7 para botões sinaleiros

A regra 13 em (12) mostra a única combinação onde a situação final do produto é classificada como *Aprovado1*. No exato ponto médio dos conjuntos de cada entrada temos a cor especificada e a luminosidade adequada. Estes valores ideais podem ser vistos na regra gráfica da Figura 36.

$$\text{If } (Cor = CE) \text{ and } (Luminosidade = LC) \text{ Then } (Sit = AP1). \quad (12)$$

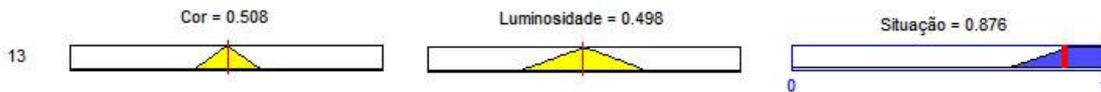


Figura 36: Regra 13 para botões sinaleiros

A outra situação intermediária é mostrada pela regra 16 em (13), onde a cor esta dentro das especificações, porém escura e a luminosidade está muito alta, o que compensa a cor escura. Segundo o especialista, esta combinação leva o produto à situação *Aprovado2*. A regra gráfica com seus valores pode ser vista na Figura 37.

$$\text{If } (Cor = CEE) \text{ and } (Luminosidade = LMA) \text{ Then } (Sit = AP2). \quad (13)$$

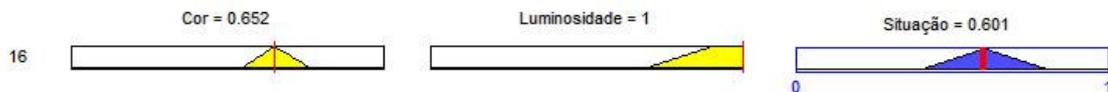


Figura 37: Regra 16

Foi gerado apenas um gráfico tridimensional para o caso dos sinaleiros, pois só existe a combinação de duas entradas. Diferentemente dos gráficos anteriores, podemos perceber por este que a melhor condição para o produto encontra-se no centro. Isso ocorre porque para o caso de sinaleiros, não pode ser considerado os maiores valores como se fossem melhores, diferentemente, por exemplo, da “Velocidade de Saída” para botões giratórios que consideramos anteriormente que quanto maior fosse, melhor seria o desempenho do botão.

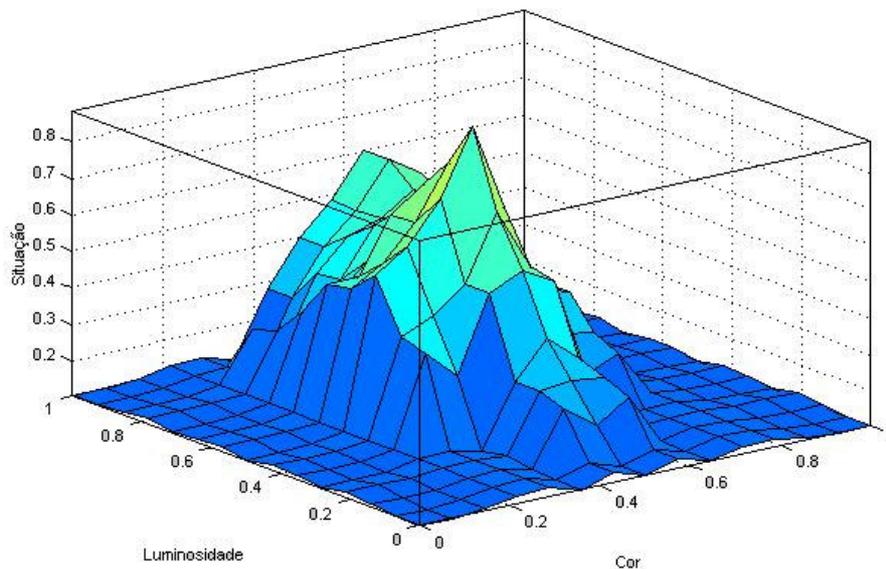


Figura 38: Gráfico Tridimensional para a interação entre as variáveis *Cor* e *Luminosidade*

5 ANÁLISE DO SISTEMA DE INSPEÇÃO

Nesta etapa do estudo consideraremos e mensuraremos a porcentagem de falhas dos inspetores. Para tanto utilizaremos a estatística como ferramenta, mas especificamente a análise do sistema de medição ou MSA (Measurement System Analysis) [5].

Participaram desta análise, dois inspetores humanos e o sistema fuzzy desenvolvido.

Foram montadas trinta peças de cada família dos produtos focados nos estudos anteriores, as quais foram avaliadas por um especialista e classificadas utilizando as situações AP1, AP2, AP3 e REP conforme estabelecido na seção 4, esta classificação foi assumida como o padrão, ou seja, é desejável que as avaliações dos inspetores e do sistema classifiquem as trinta peças de forma idêntica.

Em um MSA, os inspetores devem inspecionar as peças mais de uma vez para que possam ser avaliados três pontos principais [5]:

- Grau de concordância entre as respostas de um mesmo inspetor;
- Grau de concordância entre as respostas do inspetor e o padrão;
- Grau de concordância entre as respostas dos avaliadores.

Utilizaremos três medições para cada peça por cada inspetor e pelo modelo fuzzy.

Realizaremos um MSA atributivo, ou seja, os inspetores avaliarão as peças de forma qualitativa, sem considerar valores numéricos, classificando-as entre as quatro possíveis situações já mencionadas. Para o caso do sistema fuzzy, como este precisa de valores numéricos para ser inseridos nos gráficos, as medições das características foram efetuadas e foi estabelecida uma faixa de equivalência entre os valores máximos e mínimos dos gráficos e os valores máximos e mínimos reais dos produtos. A partir desta equivalência se tornou possível inserir os resultados nos gráficos fuzzy e gerar classificação atributiva entre as quatro possíveis situações.

Antes do início desta análise foi necessária uma calibração do sistema fuzzy até que o mesmo mostrasse níveis elevados de repetitividade e reprodutibilidade.

5.1 MSA para Botões Giratórios

Baseados nas inspeções das características de entrada, os inspetores e o sistema classificaram as trinta peças e os níveis avaliados no MSA podem ser vistos nos gráficos abaixo:

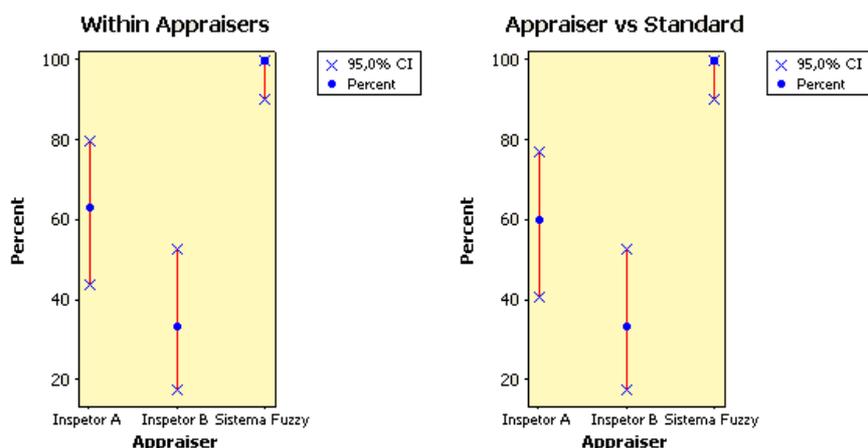


Figura 39: MSA para Botões Giratórios

O gráfico à esquerda “*Within Appraisers*”, mostra o grau de concordância entre as conclusões de cada inspetor sobre uma mesma peça em porcentagem, ou seja, mostra quantas vezes um mesmo inspetor classificou uma mesma peça de forma coerente entre as três rodadas de inspeções. Os resultados podem ser vistos na tabela abaixo:

Inspetor	# Peças Inspeccionadas	# Peças em Concordância	% de Concordância
Inspetor A	30	19	63,33%
Inspetor B	30	10	33,33%
Sistema Fuzzy	30	30	100,00%

Tabela 4: Resultado do MSA para Botões Giratórios (Concordância entre medidas)

É fácil perceber que o sistema fuzzy teve o melhor desempenho, assim como também é possível perceber que o inspetor A é mais experiente e possui melhor conhecimento que o B.

O gráfico à direita “*Appraiser vs Standard*”, mostra o grau de concordância entre as avaliações do inspetor e o padrão previamente estabelecido. Mais uma vez percebe-se a diferença entre os inspetores e o sistema fuzzy. Os resultados em relação ao padrão podem ser vistos na tabela abaixo:

Inspetor	# Peças Inspeccionadas	# Concord. c/ o Padrão	% de Concordância
Inspetor A	30	18	60,00%
Inspetor B	30	10	33,33%
Sistema Fuzzy	30	30	100,00%

Tabela 5: Resultado do MSA para Botões Giratórios (Inspetor x Padrão)

O grau de concordância entre os inspetores e o sistema fuzzy foi de 23,33%. Este baixo valor se deve ao fato de existirem quatro possíveis saídas e não duas como habitual além da disparidade entre o nível de acerto entre os inspetores e o sistema que neste caso esta sendo tratado como um terceiro inspetor.

O valor de 95% foi escolhido como intervalo de confiança e é representado pelas marcações em “X” no gráfico.

5.2 MSA para Botões Travantes

A análise para botões travantes é similar à realizada para os giratórios e o intervalo de confiança é o mesmo.

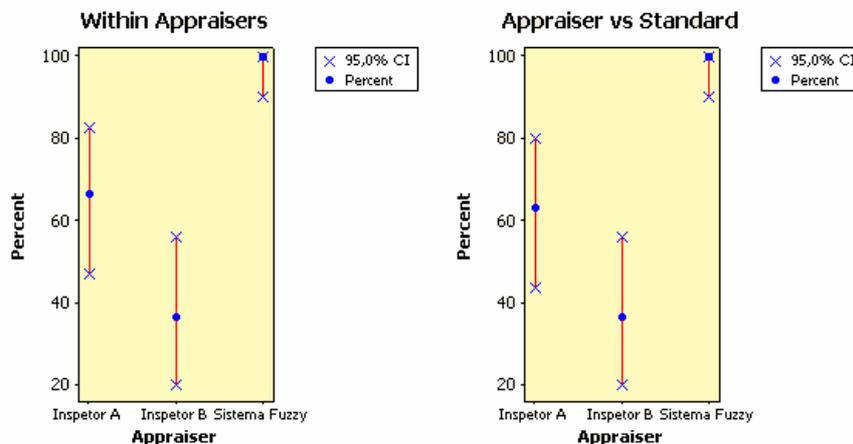


Figura 40: MSA para Botões Travantes

Os resultados para o gráfico “*Within Appraisers*” para botões travantes seguem na tabela abaixo:

Inspetor	# Peças Inspeccionadas	# Peças em Concordância	% de Concordância
Inspetor A	30	20	66,67%
Inspetor B	30	11	36,67%
Sistema Fuzzy	30	30	100,00%

Tabela 6: Resultado do MSA para Botões Travantes (Concordância entre medidas)

Os resultados para o gráfico “*Appraiser vs Standard*”, podem ser vistos na tabela abaixo:

Inspetor	# Peças Inspeccionadas	# Concord. c/ o Padrão	% de Concordância
Inspetor A	30	19	63,33%
Inspetor B	30	11	36,67%
Sistema Fuzzy	30	30	100,00%

Tabela 7: Resultado do MSA para Botões Travantes (Inspetor x Padrão)

O grau de concordância entre os inspetores foi de 33,33%, também um valor baixo, assim como na análise para botões giratórios.

5.3 MSA para Sinaleiros

O estudo do sistema de medição realizado para os sinaleiros mostrou claramente a diferença entre os produtos e o quanto as características deste produto são mais complexas para serem analisadas.

Comparamos apenas neste MSA apenas a entrada *Luminosidade*, pois para efetuar as medições a serem utilizadas na lógica fuzzy, não possuíamos equipamento para leitura da *Cor*.

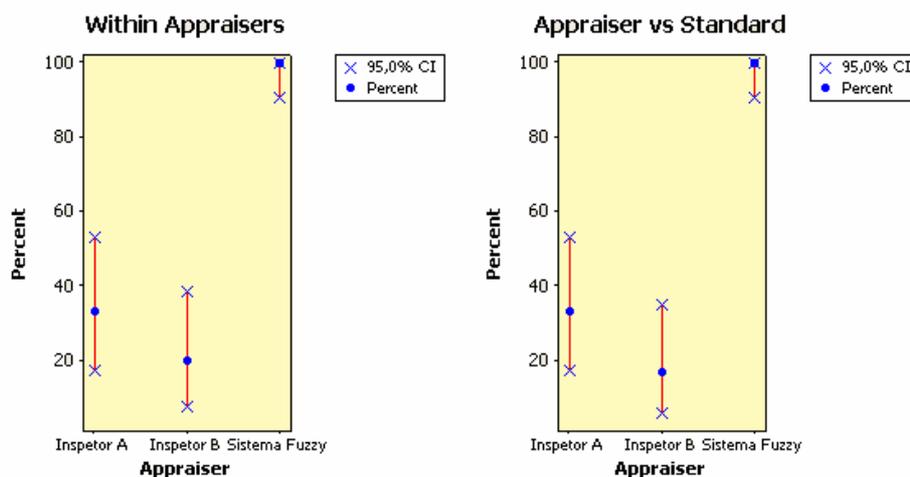


Figura 41: MSA para Botões Sinaleiros

É possível perceber como a avaliação deste produto causa maior dúvida entre os

inspetores.

Os resultados para a concordância entre as medidas realizadas por cada inspetor podem ser vistos na tabela abaixo:

Inspetor	# Peças Inspeccionadas	# Peças em Concordância	% de Concordância
Inspetor A	30	10	33,33%
Inspetor B	30	6	20,00%
Sistema Fuzzy	30	30	100,00%

Tabela 8: Resultado do MSA para Sinaleiros (Concordância entre medidas)

Os resultados para concordância com o padrão seguem na tabela abaixo:

Inspetor	# Peças Inspeccionadas	# Concord. c/ o Padrão	% de Concordância
Inspetor A	30	10	33,33%
Inspetor B	30	5	16,67%
Sistema Fuzzy	30	30	100,00%

Tabela 9: Resultado do MSA para Sinaleiros (Inspetor x Padrão)

O grau de concordância entre inspetores foi de 6,67% acompanhando os resultados anteriores.

6 CONCLUSÃO

Em uma organização, quando há dúvidas entre inspetores sobre a aprovação ou não do produto, as mesmas são esclarecidas com os supervisores ou com inspetores mais experientes, porém mesmo para estes a dúvida pode existir em determinadas situações. Para estes casos a utilização da lógica fuzzy se mostrou extremamente aplicável.

A aplicação da lógica fuzzy oferece à organização o apoio necessário à tomada de decisão pelos os inspetores da qualidade padronizando e classificando os produtos de acordo com as saídas. Outro resultado relevante foi a definição clara de quatro situações possíveis resultantes da inspeção. Esta classificação foi de muita importância para que sejam evitados retrabalhos e descartes desnecessários, assim como o envio de peças que não atendam as expectativas dos clientes. A aplicabilidade deste estudo se estende para qualquer tipo de análise da qualidade de produtos. Escolhendo as entradas corretas e especificando a saída de acordo com as necessidades de cada organização, este sistema fuzzy pode ser aplicado em qualquer fábrica, seja ela de componentes elétricos ou não.

Como pôde ser percebido nas análises do sistema de inspeção, os inspetores não foram capazes de qualificar as peças em quatro classificações diferenciadas de forma sistemática assegurando uma decisão coerente. Isso ocorreu, pois os inspetores estão acostumados a decidir apenas entre duas possíveis classificações, aprovado ou reprovado. Para MAS's realizados considerando apenas estas duas possíveis situações de saída, o Inspetor A possui faixa de acerto entre 85% e 92% e o Inspetor B, 78% e 84%.

O sistema se mostrou capaz para o pior caso, classificando em quatro possíveis situações de saída com sucesso.

Continuação da Tabela 2

Força de Entrada			Força de Saída				Folga				Situação			
FEA	FEM	FEB	FSA	FSM	FSMB	FSB	FA	FMA	FM	FB	AP1	AP2	AP3	REP
		X	X					X				X		
		X	X						X				X	
		X	X							X		X		
		X		X			X						X	
		X		X				X					X	
		X		X					X			X		
		X		X						X	X			
		X			X		X						X	
		X			X			X				X		
		X			X				X			X		
		X			X					X	X			
		X				X	X						X	
		X				X		X				X		
		X				X			X			X		
		X				X				X		X		

Tabela 2 – Tabela Verdade para Botões Travantes

Tabela 3 – Tabela Verdade para Sinaleiros

Variáveis de Entrada										Variáveis de Saída			
Cor					Luminosidade					Situação			
CFEC	CEC	CE	CEE	CFEE	LMA	LA	LC	LB	LMB	AP1	AP2	AP3	REP
X					X								X
X						X							X
X							X						X
X								X					X
X									X				X
	X				X								X
	X					X						X	
	X						X				X		
	X							X				X	
	X								X				X
		X			X						X		
		X				X						X	
		X					X					X	
		X						X					X
		X							X				X
			X		X								X
			X			X							X
			X				X						X
			X					X					X
			X						X				X

Tabela 3 – Tabela Verdade para Sinaleiros