



Universidade Federal
de São João del-Rei

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DE QUALIDADE
NA PRODUÇÃO DE CERVEJA**

KEIVY EVILÁZIO GOMES

OURO BRANCO - MG

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

KEIVY EVILÁZIO GOMES

**APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DE QUALIDADE
NA PRODUÇÃO DE CERVEJA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São João Del-Rei, como pré-requisito para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Química.

Orientador:
Prof. Dr. Edson Romano Nucci

OURO BRANCO – MG
2022

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G633a Gomes, Keivy Evilázio.
 Aplicação da Lógica Fuzzy no Controle de Qualidade
 na Produção de Cerveja / Keivy Evilázio Gomes ;
 orientador Edson Romano Nucci. -- Ouro Branco, 2022.
 70 p.

 Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química) -- Universidade Federal de São
João del-Rei, 2022.

 1. Qualidade da cerveja. 2. Pilsen. 3. Sistemas
Inteligentes. 4. Fuzzy. I. Nucci, Edson Romano ,
orient. II. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

NOMEAÇÃO DE BANCA EXAMINADORA Nº 57 / 2022 - PPGEQ (13.13)

Nº do Protocolo: 23122.052129/2022-36

Ouro Branco-MG, 21 de dezembro de 2022.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **KEIVY EVILÁZIO GOMES**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI, EM 01 DE DEZEMBRO DE 2022.

BANCA EXAMINADORA:

(Assinado digitalmente em 21/12/2022 19:58)
ALESSANDRA COSTA VILACA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DQBIO (12.26)
Matrícula: 1321232

(Assinado digitalmente em 21/12/2022 15:47)
EDSON ROMANO NUCCI
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DQBIO (12.26)
Matrícula: 1811284

(Assinado digitalmente em 21/12/2022 16:17)
JUAN CANELLAS BOSCH NETO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEQUI (12.29)
Matrícula: 1742695

(Assinado digitalmente em 23/02/2023 13:45)
ANDRÉ AGUIAR MENDES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 045.067.856-30

Para verificar a autenticidade deste documento entre em
<https://sipac.ufsj.edu.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **57**, ano:
2022, tipo: **NOMEAÇÃO DE BANCA EXAMINADORA**, data de emissão: **21/12/2022** e o código
de verificação: **77a44302ba**

Dedico este trabalho ao meu pai Vander Deusdete G. da Silva, minha mãe Marlene dos Remédios R. Gomes e as minhas irmãs Ketlen R. Gomes e Klarisse R. Gomes.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Edson Romano Nucci pela excelente orientação, pelo apoio, pela confiança no meu trabalho e pela amizade. Muito Obrigado.

Aos meus pais e minhas irmãs, que sempre estiveram me apoiando durante toda minha jornada.

A todos amigos e funcionários que a UFSJ me proporcionou durante esses anos de estudos.

A CAPES pelo apoio durante todo período de estudos.

A Universidade Federal de São João Del-Rei pela oportunidade de receber todo conhecimento necessário.

Resumo

O setor cervejeiro, devido ao aumento da atividade produtiva e ao gosto mais exigente do consumidor, tem buscado melhorar a qualidade da cerveja produzida, tendo inclusive utilizado metodologias de inteligência artificial para lidar com a incerteza, a subjetividade e a complexidade associada a esse tipo de problema de engenharia de processos. O sistema Fuzzy é uma dessas metodologias que, além da generalidade e da capacidade para modelar problemas do mundo real, atuam no sentido de contornar a imprecisão implícita em problemas de tomada de decisão. Assim, esta pesquisa teve por objetivo desenvolver dois sistemas de apoio de decisão por meio da lógica Fuzzy aplicados ao processo cervejeiro. O primeiro sistema Fuzzy foi desenvolvido para avaliar a qualidade da cerveja Pilsen e o segundo sistema Fuzzy teve como objetivo identificar diferentes tipos de cerveja. A metodologia envolveu a obtenção de informações sobre os seguintes tipos de cerveja: Pilsen, Trigo, Stout e IPA. O sistema foi desenvolvido nos softwares SCILAB® e INFUZZY e as variáveis de entrada para o primeiro sistema de apoio de decisão foram o CO₂, cor, densidade, pH e o teor alcoólico, e a variável de resposta foi a qualidade da cerveja. O sistema desenvolvido teve uma taxa de acerto acima de 90% referente a qualidade da cerveja considerada aprovada, além de ser possível, pelas superfícies de respostas, identificar as melhores regiões quando se tem o produto considerado aprovado, aprovado com alteração ou reprovado. Além disso, considerando cenários simulados, o segundo sistema Fuzzy previu corretamente, em mais de 99% das vezes, o teor alcoólico, cor e a densidade da cerveja produzida, indicando ao usuário o tipo de cerveja escolhido.

Palavras-chaves: Qualidade da cerveja; Pilsen; Bioprocessos; Sistemas Inteligentes; Fuzzy.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	15
2.1. OBJETIVO GERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. CERVEJA E SUA HISTÓRIA	16
3.2. PRODUÇÃO DE CERVEJA NO BRASIL.....	16
3.3. TIPOS E CLASSIFICAÇÃO DE CERVEJA.....	18
3.4. LEGISLAÇÃO	19
3.5. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERVEJA	20
3.6. SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO UTILIZANDO LÓGICA FUZZY 25	
3.7. APLICAÇÃO DO SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO EM PROCESSOS31	
3.8. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	33
3.8.1. <i>INFUZZY</i>	33
3.8.2. <i>SCILAB</i> ®	35
4. METODOLOGIA.....	38
4.1. SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO PARA AVALIAR A QUALIDADE DA CERVEJA PILSEN	38
4.2. SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO PARA AVALIAÇÃO DO ESTILO DE CERVEJA	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA CERVEJA PILSEN	44
5.1.1. <i>SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO UTILIZANDO SOFTWARE INFUZZY</i> 44	

5.1.2.	<i>SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO UTILIZANDO SOFTWARE</i>	
	<i>Scilab®</i>	54
5.2.	PROGRAMAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO TIPO DE CERVEJA.....	58
6.	CONCLUSÕES.....	65
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

Lista de Figuras

Figura 1. Classificação de cervejas quanto à cor (adaptado de DINSLAKEN, 2016).....	18
Figura 2. Fluxograma do processo de produção de uma cerveja artesanal; 1) Malte/ 2) Moagem/ (3, 4 e 5) Mosturação (Brassagem) / 6) Fervura/ 7) Resfriamento/ 8) Fermentação/ 9 e 10) Carbonatação e envase/ 11) Consumo (DINSLAKEN, 2016).	21
Figura 3. Exemplos e equações para cada tipo de função de Pertinência; (a) Triangular; (b) Trapezoidal e (c) Gaussiana (Nucci, 2007).	28
Figura 4. Funções de pertinência para a variável linguística temperatura (adaptado de HOFFMANN et al., 2016).....	29
Figura 5. Funcionamento do sistema de inferência Fuzzy (HOFFMANN et al., 2016).	30
Figura 6. Tela de controle sobre o projeto Fuzzy (adaptado de POSSELT et al., 2015).	33
Figura 7. Tela de edição das variáveis de entrada e saída (adaptado de POSSELT et al., 2015).....	34
Figura 8. Tela de definição de regras (adaptado de POSSELT et al., 2015).....	35
Figura 9. Fuzzy Logic Designer (Próprio Autor).	36
Figura 10. Membership Function Editor (Próprio Autor).	37
Figura 11. Surface Viewer (Próprio Autor).....	38
Figura 12. Fluxograma do programa para a avaliação da qualidade das cervejas (Próprio Autor).	39
Figura 13. Fluxograma do programa para avaliação do tipo de cerveja (Próprio Autor).	42
Figura 14. Representação gráfica da variável linguística CO ₂ e suas funções de pertinência. (-) baixo; (-) ideal; (-) alto (Próprio Autor).	44
Figura 15. Representação gráfica da variável linguística cor e suas funções de pertinência. (-) Palha; (-) Amarelo ou Ouro; (-) Âmbar (Próprio Autor).....	45
Figura 16. Representação gráfica da variável linguística densidade e suas funções de pertinência, (-) Ideal; (-) Alta (Próprio Autor).	45
Figura 17. Representação gráfica da variável linguística pH e suas funções de pertinência. (-) baixo; (-) ideal; (-) alto (Próprio Autor).	46
Figura 18. Representação gráfica da variável linguística teor alcoólico e suas funções de pertinência. (-) baixo; (-) ideal; (-) alto (Próprio Autor).....	46

Figura 19. Representação gráfica da variável linguística qualidade da cerveja e suas funções de pertinência. (-) Reprovada; (-) Aprovada com alterações; (-) Aprovada (Próprio Autor)...	47
Figura 20. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas $\text{CO}_2 \times$ Densidade.	55
Figura 21. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas $\text{CO}_2 \times$ pH.	55
Figura 22. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas $\text{CO}_2 \times$ Cor.	56
Figura 23. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas $\text{CO}_2 \times$ Teor Alcoólico.	56
Figura 24. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas Teor Alcoólico \times Densidade.	57
Figura 25. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas Teor Alcoólico \times pH.	57
Figura 26. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas Teor Alcoólico \times Cor.	58
Figura 27. Representação gráfica da variável linguística IBU e suas funções de pertinência. (-) Cerveja de trigo Alemã; (-) Pilsen alemã; (-) Stout Americana; (-) American IPA (Próprio Autor).	60
Figura 28. Representação gráfica da variável linguística Teor Alcoólico e suas funções de pertinência. (-) Cerveja de trigo Alemã; (-) Pilsen alemã; (-) Stout Americana; (-) American IPA (Próprio Autor).	60
Figura 29. Representação gráfica da variável linguística Cor e suas funções de pertinência. (-) Cerveja de trigo Alemã; (-) Pilsen alemã; (-) Stout Americana; (-) American IPA (Próprio Autor).	61
Figura 30. Representação gráfica da variável linguística Densidade Final e suas funções de pertinência. (-) Cerveja de trigo Alemã; (-) Pilsen alemã; (-) Stout Americana; (-) American IPA (Próprio Autor).	61
Figura 31. Representação gráfica da variável linguística Tipos de Cervejas e suas funções de pertinência. (-) Cerveja de trigo Alemã; (-) Pilsen alemã; (-) Stout Americana; (-) American IPA (Próprio Autor).	63

Lista de Tabelas

Tabela 1. Classificação das cervejas no Brasil (JORGE, 2004).	19
Tabela 2. Variáveis, intervalo, termos linguísticos, funções de pertinência e parâmetros utilizados na construção do Sistema INFUZZY para avaliação da qualidade da cerveja (Próprio Autor).	40
Tabela 3. Variáveis, intervalo, termos linguísticos, funções de pertinência e parâmetros utilizados na construção do Sistema SCILAB® para avaliação da qualidade da cerveja (Próprio Autor).	41
Tabela 4. Variáveis, intervalo, termos linguísticos, funções de pertinência e parâmetros utilizados na construção do Sistema INFUZZY para identificar os tipos de cerveja.	42
Tabela 5. Base de regras proposta para avaliação da qualidade das cervejas (Próprio Autor).	48
Tabela 6. Simulação alterando os valores para variável teor alcoólico e para o método de defuzzificação da variável saída (Próprio Autor).	49
Tabela 7. Simulação alterando os valores para variável CO ₂ e para o método de defuzzificação da variável saída (Próprio Autor).	50
Tabela 8. Simulação alterando os valores para variável Densidade e para o método de defuzzificação da variável saída (Próprio Autor).	51
Tabela 9. Simulação alterando os valores para variável pH e para o método de defuzzificação da variável saída (Próprio Autor).	52
Tabela 10. Simulação alterando os valores para variável Cor e para o método de defuzzificação da variável saída (Próprio Autor).	53
Tabela 11. Base de regras proposta para avaliação do tipo de cerveja (Próprio Autor).	62
Tabela 12. Simulação com diferentes valores de IBU, teor alcoólico, cor e densidade final e também diferentes métodos de defuzzificação para o resultado final que é o tipo da cerveja, sendo 1 o estilo American IPA, 3 o estilo Pilsen Alemã, 5 a cerveja Stout Americana e 7 a Cerveja de Trigo Alemã.	64

Lista de Abreviaturas e Símbolos

BJCP - *Beer Judge Certification Program* - elaborou um guia de estilos com base nas informações das cervejas;

EBC - *European Brewing Convention* – escala para medir a cor da cerveja;

IPA - *India Pale Ale*- nome do estilo de cerveja;

SRM - *Standard Reference Method* - escala para medir a cor da cerveja;

FLS - *Fuzzy Logic System*

IBU - *International Bitterness Unit*- unidade que mede a quantidade de amargor em uma bebida;

1. INTRODUÇÃO

No mercado de bebidas, a cerveja é a bebida alcoólica que se destaca em relação ao consumo no Brasil. É importante entender como o produto cerveja obteve a popularidade para o consumo, visto que no século XIX não possuía um apelo mostrado pelo marketing nos dias atuais. O consumo de produtos e serviços que fazem uma interação com o consumidor voltados para uma maior sociabilidade é significativo, sendo assim o destaque da cerveja (Monteiro; Araujo, 2020).

As cervejas, de acordo com a legislação brasileira, apresentam 5 parâmetros importantes que a clássica diferenciando-a: teor alcoólico, cor, teor de extrato final, extrato primitivo e fermentação; esta última classifica a cerveja em dois grandes grupos, ou seja, as *Ales* de alta fermentação e as do tipo *Lager* de baixa fermentação e baixo teor alcoólico. Dentre estes estilos, a cerveja mais popular é a cerveja do tipo pilsen, que é uma *Lager* e atualmente é a mais consumida em todo mundo. Este fato se dá, de acordo com a *Beer Judge Certification Program* (BJCP), pelo fato da pilsen ter a característica de conter um corpo leve, altamente atenuado, de cor dourada e de baixa fermentação. Mostrando excelente retenção de espuma e um aroma de lúpulo floral, sendo uma cerveja fresca, limpa e refrescante (ROSA e AFONSO, 2015; HOFFMANN *et al.*, 2016).

Entretanto, tem-se buscado cada vez mais, maneiras de maximizar o processo cervejeiro, com produtos de maior qualidade para atender os consumidores mais exigentes. Seguindo este raciocínio, houve um grande crescimento na utilização e desenvolvimento de técnicas de inteligência artificial, sistemas inteligentes ou conhecido também como sistemas especialistas, principalmente em áreas que possuem alto grau de incerteza, subjetividade e complexidade como muitos problemas da engenharia (PRADO *et al.*, 2007).

O controle manual em um processo industrial contínuo é exercido instante a instante, por intermédio de decisões que exigem do especialista o conhecimento necessário para relacionar ações e resultados. Exigem ainda o acompanhamento da operação, algumas pilotagens nas variações operacionais, experiência e segurança suficientes para assumir riscos em situações extremas. Deste modo, com o avanço tecnológico, há melhorias em *hardware* e *software* permitindo que os computadores apresentem diversas aplicações em áreas convencionais. Um exemplo de sistemas que utilizam a tecnologia da informação para a manipulação de conhecimentos especializados com benefícios quantitativos e qualitativos é conhecido como sistemas inteligentes (REZENDE, 2005).

Sistemas inteligentes são sistemas computacionais que resolvem problemas de forma similar ao modo como um especialista humano os resolveria, possuindo capacidade de decisão em campos específicos do conhecimento (SELLITO, 2002). Os sistemas especialistas buscam a resposta e aprendem com a experiência, resolvendo problemas por análise inferencial, a partir de percepções e intensidades aleatórios e apoiados em bases de conhecimento que podem, inclusive, ser transferidas. Os sistemas especialistas possuem:

- (i) um banco de conhecimentos que contém fatos, regras e padrões;
- (ii) um dispositivo de inferência capaz de tomar decisões;
- (iii) uma linguagem na qual as regras são escritas;
- (iv) um organizador que inclui o dispositivo de inferência, o gerenciador da base de conhecimento e as interfaces de usuários (NIKOLOPOULOS, 1997; RABUSKE, 1995), e dentre esses sistemas, destaca-se a Lógica Fuzzy.

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver dois sistemas de apoio de decisão, ou seja, o primeiro para avaliar a qualidade de um determinado estilo de cerveja e o segundo em relação à classificação de diferentes estilos de cervejas utilizando a Lógica Fuzzy.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver sistemas de apoio de decisão para verificar a qualidade de cerveja Pilsen e classificação de diferentes estilos de cervejas utilizando a Lógica Fuzzy.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as variáveis do processo mais influentes;
- Construir as funções de pertinência para cada uma delas;
- Construir o Banco de Regras/Base de conhecimento;
- Definir a melhor função de pertinência a ser utilizada na simulação, disponíveis na literatura;
- Realizar as simulações do processo;
- Comparar os resultados obtidos com os da literatura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CERVEJA E SUA HISTÓRIA

Segundo a legislação brasileira, a cerveja é definida como a bebida obtida pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro oriundo do malte de cevada e água potável, por ação da levedura adicionada de lúpulo (SEBRAE, 2017). Por não haver um acordo entre os historiadores sobre a origem dessa bebida (SACHS, 2001), torna-se difícil a precisão em datar a sua origem, entretanto, estudos indicam que a produção da cerveja teve seu início por volta de 8.000 a.C., na Palestina (AQUARONE et al., 2001).

A cerveja é uma das bebidas mais consumidas em todo o mundo e tem um alto valor histórico. O homem já tinha o conhecimento da fermentação de grãos há muito tempo. Acredita-se que a primeira cerveja foi produzida pelos sumérios e assírios cerca de 8 mil anos. Tempos depois esta bebida chegou ao Egito e logo foram desenvolvidas variedades como a Cerveja dos Notáveis e a Cerveja dos Tebas. Os egípcios divulgaram a cerveja entre os povos orientais e a difundiram na bacia do Mediterrâneo e, de lá, para o resto da Europa (ROSA e AFONSO, 2015; MEGA *et al.*, 2011).

A variação na proporção dos principais ingredientes (água, lúpulo, malte e leveduras), bem como o processo produtivo e o clima de cada lugar resultavam em diferentes tipos de cerveja. Da Suíça, a fabricação de cerveja se espalhou pela Europa e nas regiões dos Alpes surgiram os mais tradicionais e famosos fabricantes dos estilos conhecidos atualmente que foram a Alemanha, República Tcheca, Eslováquia e Áustria, em que até hoje há cervejas fabricadas cuja formulação data a mais de 900 anos (ROSA e AFONSO, 2015; HOFFMANN *et al.*, 2016).

No Brasil, as primeiras cervejarias apareceram apenas em 1808 com a chegada da família real, quando comerciantes se instalaram e começaram a vender uma bebida até então desconhecida. Até meados do século XX, ainda havia diversas barreiras nesse mercado, por conta de movimentos contrários ao consumo alcoólico, a indisposição de matéria-prima e as duas grandes guerras mundiais que ocorreram na época (LIMBERGER, 2013; MEGA et al., 2011).

3.2. PRODUÇÃO DE CERVEJA NO BRASIL

Segundo uma pesquisa publicada em 2020 pela Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (CervBrasil), o Brasil é o 3º maior produtor de cerveja do mundo, atrás apenas de China e Estados Unidos e é um dos setores mais relevantes da economia brasileira. Quanto ao

consumo per capita, o Brasil ocupa a singela posição de 24º na lista, com consumo de 68 L por habitante, mostrando um enorme potencial de crescimento (SEBRAE, 2017). A CervBrasil, estipula que a produção nacional seja de aproximadamente 14 bilhões de litros por ano, representando 1,6% do Produto Interno Bruto (PIB), com faturamento de R\$100 bilhões/ano e geração de 2,7 milhões de empregos.

Um levantamento da Associação Brasileira de Produtores de Lúpulo (Aprolúpulo), mostrou que no ano de 2021, o Brasil teve um crescimento de 110% de hectares cultivados para cerveja, em relação ao ano anterior. No ranking de percentual de produtores, Santa Catarina é o estado que tem maior percentual (27%), seguido por Rio Grande do Sul (22%), São Paulo (18%), Paraná (7%), Minas Gerais (6%) e Rio de Janeiro (5%). Esse aumento reflete o crescente mercado das cervejas artesanais no país, sobretudo nas regiões Sul e Sudeste, que crescem por volta de 20% ao ano, e movimentam um setor que responde por um faturamento de 2 bilhões de reais por ano.

No Brasil, a partir do final da década de 80, teve início esse segmento. Nomeado nos Estados Unidos de *Craft Brewing*, cervejaria artesanal, e no Brasil é conhecido como “Produção Alternativa de Cerveja”. Os empresários que investem capital neste tipo de empreendimento, não estão preocupados em competir em um mercado global, ou com grandes empresas no mercado doméstico. Concentram-se em oferecer ao consumidor um produto e serviço único, diferenciado e com alto valor agregado (KALNIN; CASAROTTO FILHO; CASTRO, 2002).

As cervejas especiais, também conhecidas como artesanais, *premium*, *superpremium*, *gourmet*, são cervejas dotadas de atributos de diferenciação, comparadas às cervejas produzidas em larga escala. Essas cervejas são caracterizadas, de modo geral, pelo uso de matéria prima nobre e processos de produção refinados (STEFENON, 2012).

Nesse sentido, as microcervejarias, com a produção de cervejas artesanais, têm apresentado uma tendência de crescimento nos últimos anos, e projeta-se o alcance de 2% do *market share* (participação de mercado) para os próximos dez anos (SEBRAE, 2014).

Embora a produção nacional de cerveja ainda seja dominada pelas grandes cervejarias, e o mercado cervejeiro seja um mercado altamente concentrado, que tem como líder a empresa Ambev, o setor de cervejas especiais vem crescendo mais do que o setor das cervejas voltadas para as grandes massas populacionais. À medida que as grandes empresas crescem a uma taxa de 7% ao ano, o segmento das micro cervejarias cresce, em média, a 14% ao ano (MATOS, 2011).

3.3. TIPOS E CLASSIFICAÇÃO DE CERVEJA

Os ingredientes para a produção da cerveja são, água, malte, lúpulo, levedura e em alguns casos, se adiciona adjuntos cervejeiros. Além disso, mesmo contendo a mesma formulação, processos produtivos distintos podem gerar cervejas completamente diferentes. Sendo assim, é necessário classificar os tipos de cervejas existentes, e nomear cada estilo. Desta forma, foram criadas legislações e entidades, como a *Beer Judge Certification Program* (BJCP), para classificar e nomear as cervejas (SOUZA, 2018; BEER JUDGE CERTIFICATION PROGRAM, 2019).

O BJCP foi o responsável por catalogar uma infinidade de tipos e estilos de cerveja e elaborou um guia de estilos com base nas informações das cervejas como, por exemplo, cor, amargor, cheiro e sabor. Este guia de estilos surgiu em 1985 nos Estados Unidos e atualmente existem várias cópias traduzidas em diversas línguas sendo reconhecido no mundo inteiro (BONACCORSI, 2016).

De acordo com o Decreto nº 6,841 de 4 de junho de 2009, e a instrução normativa nº 54, de 5 de novembro de 2001, as cervejas no Brasil são classificadas de acordo com cinco características principais que são: extrato primitivo, cor, teor alcoólico, proporção de malte de cevada e fermentação. Extrato primitivo ou original é a quantidade de substâncias dissolvidas (extrato) do mosto, que deu origem à cerveja e se expressa em porcentagem (%) em peso. As classificações dos extratos estão expressas na **Tabela 1**.

A cor da cerveja é uma característica marcante e é definida em clara ou escura pela legislação. A classificação da cor da cerveja é medida em uma escala denominada de *European Brewing Convention* (EBC), contudo, há também uma escala americana muito usada denominada de *Standard Reference Method* (SRM). Esta escala pode ser verificada na **Figura 1** com todas as cores e suas unidades EBC e SRM correspondentes.

Figura 1. Classificação de cervejas quanto à cor (adaptado de DINSLAKEN, 2016).

SRM	2-3	3-4	5-6	6-9	10-14	17-18	19-22	22-30	30-35	30+	40+
EBC	4-6	4-8	10-12	12-18	20-28	33-36	37-43	43-59	59-69	69	79
COR	Palha	Amarelo	Ouro	Âmbar profundo, cobre	Cobre	Cobre escuro	Marrom	Marrom escuro	Marrom muito escuro	Negro	Negro opaco

Tabela 1. Classificação das cervejas no Brasil (JORGE, 2004).

Pela fermentação
Alta fermentação (12- 15°C)
Baixa fermentação (5- 10°C)
Extrato primitivo
Leve → Acima de 5,0% até 10,5% em massa
Comum → Acima de 10,5% até 12,5% em massa
Extra → Acima de 12,5% até 14,0% em massa
Forte → Acima de 14,0% em massa
Cor
Clara → menos de 20 unidade EBC
Escura → 20 ou mais unidades EBC
Teor alcoólico
Sem álcool → menos de 0,5% em volume de etanol
Alcoólica → igual ou maior que 0,5% em volume de etanol

A cerveja também pode ser caracterizada pela proporção de malte de cevada em:

- a) **cerveja de puro malte**, aquela que possuir cem por cento de malte de cevada, em peso, sobre o extrato primitivo, como fonte de açúcares;
- b) **cerveja**, aquela que possuir proporção de malte de cevada maior ou igual a cinquenta e cinco por cento em peso, sobre o extrato primitivo, como fonte de açúcares;
- c) **“cerveja de ...”**, seguida do nome do vegetal predominante, aquela que possuir proporção de malte de cevada maior que vinte por cento e menor que cinquenta e cinco por cento, em peso, sobre o extrato primitivo, como fonte de açúcares;

3.4. LEGISLAÇÃO

Segundo a legislação vigente no Brasil, pelo decreto N° 6.871, de 4 de junho de 2009, que regulamenta a lei n° 8.918, de 14/07/1994 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a cerveja é definida como “a bebida obtida pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro oriundo do malte de cevada e água potável, por ação da levedura, com adição de lúpulo”. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) é responsável pela fiscalização para que as bebidas sejam feitas obrigatoriamente com as suas matérias-primas selecionadas, obedecendo à regulamentação própria. (BRASIL, 2009).

Apenas em 6 de novembro de 2012 começou uma discussão sobre a regulamentação das cervejas artesanais. Em 2013 o projeto de lei nº 5.191/13 veio para estabelecer regras para as cervejas artesanais, porém não foi aprovado. Pelo decreto, poderia ser considerado um estabelecimento produtor de cerveja artesanal, aquele localizado em área urbana cuja produção máxima anual não ultrapasse trinta mil litros (GARBIN, 2017). A ideia desse projeto era desmembrar o conceito de cerveja artesanal e definir as instituições que produzem essa bebida, adequando a legislação para permitir o avanço regulamentado deste setor. O aumento nos investimentos das micro cervejarias já existentes e a ampliação e profissionalização desse mercado mostra que o Brasil passa por um renascimento na forma de consumo da bebida alcoólica mais popular do país e a mais enraizada nos costumes de socialização.

Segundo o MAPA, muitas cervejarias iniciam para consumo próprio e passam a ter distribuição nacional e às vezes destaque internacional, criando um cenário animador para os produtores. Assim, esse segmento tem crescido cerca de quatro a cinco vezes mais que o segmento das cervejas industriais, sendo que as macros cervejarias apresentam crescimento médio de 5% ao ano, segundo a Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (CervBrasil). Muitas vezes, a degustação da cerveja artesanal está associada à gastronomia, experiência sensorial mais complexa e a uma produção limitada. Tais fatores agregam valores às marcas, que crescem junto com a sofisticação dos gostos dos brasileiros (BORGES, 2015).

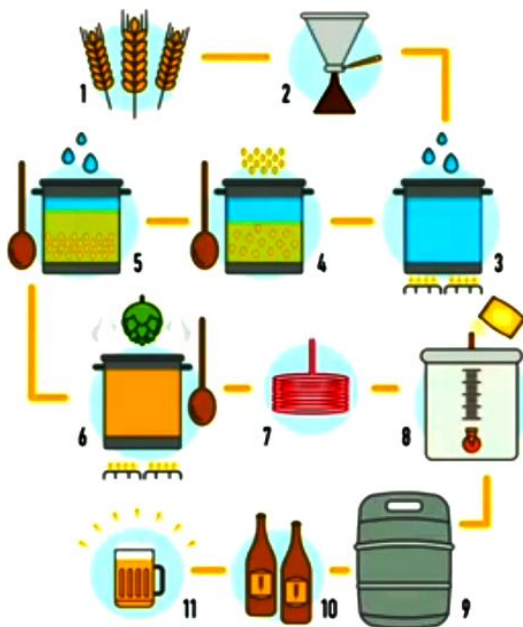
3.5. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERVEJA

Para a produção da cerveja, a cevada maltada é moída e colocada em infusão; posteriormente é coada, fervida com lúpulo e novamente coada. Adiciona-se levedura para fermentar. O mosto é deixado em repouso para maturação. Após alguns dias de "descanso", a levedura é separada do mosto e a cerveja estará pronta para ser consumida.

De acordo com Venturini Filho (2010), o processo tradicional de produção de cerveja pode ser dividido em oito operações principais: moagem do malte, mosturação ou tratamento enzimático do mosto, filtração do mosto, fervura do mosto, tratamento do mosto (remoção do precipitado, resfriamento e aeração), fermentação, maturação e clarificação.

A **Figura 2** ilustra o fluxograma do processo de produção de uma cerveja artesanal.

Figura 2. Fluxograma do processo de produção de uma cerveja artesanal; 1) Malte/ 2) Moagem/ (3, 4 e 5) Mosturação (Brassagem) / 6) Fervura/ 7) Resfriamento/ 8) Fermentação/ 9 e 10) Carbonatação e envase/ 11) Consumo (DINSLAKEN, 2016).



A moagem é a etapa inicial do processo ao qual se realiza a moagem da matéria prima, o malte, que é produto da germinação dos cereais escolhidos para a fabricação da cerveja. O cereal pode ser oriundo de cevada, trigo, milho, entre outros. Essa etapa tem como finalidade a diminuição dos grãos germinados em partes menores, rompendo a casca e desprotegendo o endosperma. Este processo pode ser realizado em moinhos de disco, de rolo ou de martelo (DRAGONE; SILVA, 2016).

Seguindo para a mosturação, o objetivo deste processo é solubilizar as substâncias do malte diretamente solúveis em água e, com o auxílio das enzimas, solubilizar as substâncias insolúveis. Esse processo é necessário pois as leveduras fermentadoras de cervejas não são capazes de utilizar o amido em sua forma original (responsável por 60% da massa seca), sendo necessário degradar as cadeias do amido a fim de formar açúcares fermentescíveis. Considera-se o processo da brassagem ou mosturação, como um dos mais complexos na produção cervejeira, devido à ocorrência de inúmeros eventos físicos e bioquímicos (RIBEIRO et al., 2018).

A filtração é a etapa responsável por separar as partes solúveis das insolúveis (bagaço, massa resultante da aglutinação da casca com os resíduos do processo). O mosto flui pela tina, sendo filtrado pelas cascas ao fundo. Em seguida, são lavadas as cascas que serviram como

filtro, promovendo melhor rendimento do açúcar que fica preso no bagaço (OETTERER et al., 2006). Só então o mosto é recirculado no tanque até ficar límpido. Posteriormente é feita a lavagem dessas cascas por passagem de água aquecida a 75 °C, etapa de fervura, nas próprias peneiras de coleta, visando à retirada do máximo de açúcar e objetivando se obter o maior extrato (KUNZE, 2010).

A fervura é a etapa encarregada pela esterilização do mosto, concentração e evaporação de substâncias indevidas nele. É nessa etapa que ocorre a sua esterilização em razão das altas temperaturas seguidas. A esterilização do mesmo é importante, pois pode haver microrganismos indesejáveis, como as leveduras selvagens, bactérias, fungos e mofos (SILVA, 2016).

Essa etapa também é responsável por formar uma parte dos sabores e aromas da cerveja, pois há extração de compostos amargos do lúpulo, formação de substâncias que irão contribuir para o sabor e o aroma da cerveja (KUCK, 2008). Esse processo dura entre 60 e 90 minutos e não pode ser muito longo, pois a reação de escurecimento não enzimático (Reação de *Maillard*), que intensifica a cor do mosto, pode ter efeito negativo, de modo a se perderem características de cor e sabor que eram desejáveis (REITENBACH, 2010). Ao final da fervura, o lúpulo usado e as matérias, coagulados, denominados de *trub*, são depositados no fundo da panela de fervura. É importante retirar o *trub*, pois esses materiais, ao serem fermentados, dão origem a sabores aguados e estranhos à cerveja (VENTURINI FILHO e CEREDA, 2001).

Para tornar mais rápida e eficiente a decantação dos materiais em suspensão, bem como para favorecer a formação de conglomerados sólidos compostos por proteínas coaguladas e outras partículas, é realizado o resfriamento do mosto, bem como uma movimentação (técnica chamada de *whirlpool*) (MATOS, 2011). Essa técnica consiste em girar o mosto na panela e em seguida deixá-lo em repouso por alguns minutos, fazendo que os sólidos em suspensão se sedimentem e vão para o fundo da panela, contribuindo com a separação do mosto para ser transferido para o fermentador. (PALMER, 2006).

O resfriamento é muito importante para o processo da cerveja, quanto mais rápido o resfriamento, menor a chance de contaminação e considera-se melhor a qualidade da cerveja. O resfriamento rápido tem como vantagem a sedimentação das proteínas para o fundo da panela, o chamado *Cold Break*, evitando a transferência das proteínas para o fermentador, diminuindo a turbidez da cerveja. Já o resfriamento lento terá sedimentação parcial das proteínas, conhecido como *Chill Haze*, que resulta em uma característica estética da cerveja notada pela turbidez. (DINSLAKEN, 2016).

Para a etapa de resfriamento, o equipamento mais utilizado é o *chiller*, um trocador de calor eficiente para essa etapa.

A fermentação é classificada como uma das etapas principais no processo cervejeiro. Ela ocorre por ação das leveduras ou fermento cervejeiro. O manuseio desses microrganismos requer uma maior atenção de forma a manter constante sua pureza e vitalidade. (BREDA, 2010). As espécies *Saccharomyces cerevisiae* e *Saccharomyces pastorianus* são as principais leveduras responsáveis pela fermentação do mosto da cerveja.

Nessa etapa, o oxigênio injetado no mosto antes da inoculação do fermento é consumido e produz alguns ácidos carboxílicos insaturados e esteróis, que atuam na síntese da membrana celular, para crescimento celular das leveduras. Esses microrganismos, por sua vez, catabolizam os açúcares simples, seja por via metabólica respiratória ou por via fermentativa. Durante essa etapa há transformação dos açúcares fermentescíveis em etanol e gás carbônico sob condições anaeróbicas, além da síntese de compostos de aroma e sabor característicos de cerveja.

No início do processo, com presença de oxigênio, os microrganismos fermentadores oxidam as moléculas simples de açúcar e produzem gás carbônico, água e energia. À medida que o oxigênio vai sendo consumido e se esgota as leveduras passam a utilizar uma nova via metabólica: a via fermentativa, produzindo duas moléculas de etanol, duas de gás carbônico e energia, a partir de uma molécula de glicose. Após esse processo a cerveja passa por um processo de maturação (BORTOLI et al., 2013).

Para as cervejas *Lagers*, a temperatura ideal é de 8 a 11°C e a fermentação dura de cinco a sete dias. Para as cervejas *Ales* a temperatura ideal varia de 18 a 22°C e essa etapa decorre em três a cinco dias (BRUNELLI, 2012).

Industrialmente, a fermentação ocorre em tanques fechados, revestidos por uma camisa externa que permite a passagem de fluido refrigerante para manter o sistema na temperatura desejada, que pode variar. Em produções artesanais o controle de temperatura é realizado em geladeira, em salas climatizadas, em temperatura ambiente, entre outras técnicas. O principal objetivo da fermentação é obter cervejas com as características sensoriais, químicas e físico-químicas desejadas (MATOS, 2011). A fermentação descrita anteriormente também é chamada de primária, tendo como produto a cerveja verde.

A maturação é considerada como uma segunda fase da fermentação ou fermentação secundária, resultando em cerveja pronta, final ou acabada (BRIGGS et al., 2004). A maturação é um processo de aperfeiçoamento dos aromas e sabores da cerveja, que começa logo após o fim da fermentação primária e continua até depois do envase da cerveja (SILVA,

2016). Esse processo tem como objetivo o início da fase de clarificação através da sedimentação de substâncias que causam a turbidez da cerveja, além de melhorar o sabor e aroma da bebida pela redução da concentração de determinadas substâncias. A maturação é importante ainda para evitar que ocorram oxidações que podem afetar sensorialmente a cerveja, e consequentemente aumentar a quantidade de gás carbônico inserido na bebida (ZUPPARDO, 2010).

Durante o período da maturação a cerveja é mantida a temperatura próxima de 0°C e as leveduras que ainda restam em suspensão terão sua atividade reduzida. Essa etapa pode acontecer em tanques ou dentro da garrafa (CARVALHO, 2007). A segunda filtração visa retirar o material sólido que fica em suspensão após a maturação, como substâncias coloidais e células de leveduras, que deixam o líquido livre de turbidez (GAVA; SILVA; FRIAS, 2008).

A maioria das cervejas são tratadas antes ou após o engarrafamento, para que haja eliminação de leveduras ou bactérias. Essa etapa é feita por pasteurização. Essa etapa ocorre por um curto aumento da temperatura em bebidas a uma temperatura que causa destruição de esporos patogênicos.

Durante a pasteurização, as bebidas são esterilizadas. A pasteurização é um processo que permite durabilidade dentro dos padrões adequados, promovendo ações com impacto direto nas propriedades sensoriais e estabilidade química da cerveja. A cerveja já envasada passa pelo interior de túneis pasteurizadores atingindo alta temperatura de 60°C e mantida nessa temperatura com objetivo de garantir a morte de microrganismos deteriorantes. Em seguida, é submetida à baixa temperatura, sofrendo um drástico resfriamento (MEGA et. al., 2011). A cerveja sofre o tratamento térmico de pasteurização, através de trocadores de calor, antes do envasamento, ou por túneis após o envasamento.

A última fase da produção da cerveja é o *envase* que consiste no seu acondicionamento em recipientes apropriados. No seu decorrer, é necessário minimizar o contato da cerveja com o oxigênio, ferro e cobre, com o objetivo de assegurar que a bebida conserve as suas qualidades, , gosto e aroma por um longo período (LIMA e FILHO, 2011).

A bebida envasada em garrafas de vidro e latas de alumínio são enviadas à pasteurização, sendo então denominada cerveja. A bebida envasada em barril não passa por este processo, sendo denominado de chope, um produto de menor vida de prateleira, devido à ausência deste processo (MARTINS et al, 2014).

O enchimento é feito em contrapressão com CO₂ de modo a evitar a formação de espuma e expulsar o O₂ contido na embalagem, que pode deteriorar a cerveja em termos

físico-químicos (oxidação) ou microbiológicos (FERNANDES, 2012). Nesse processo deve-se ter grande cuidado com possíveis fontes de contaminação, perda de gás e contato da cerveja com oxigênio, pois podem comprometer a qualidade do produto.

Esse processo confere maior estabilidade microbiológica ao produto. Uma filtração feita adequadamente, com ausência de oxigênio no processo de engarrafamento, utensílios assépticos e pasteurização realizada de maneira correta garantem a estabilidade biológica do produto (CARVALHO, 2007).

3.6. SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Os princípios de lógica Fuzzy foram desenvolvidos inicialmente por Jan Lukasiewicz (1878-1956), que em 1920 desenvolveu conjuntos com grau de pertinência que unidos aos conceitos da lógica clássica, criada por Aristóteles, deu embasamento suficiente para que na década de 60, Lofti Asker Zadeh, professor de Ciências da Computação da Universidade da Califórnia, chegasse a ser o primeiro autor de uma publicação sobre lógica Fuzzy (RIGNEL *et al.*, 2011).

A lógica Fuzzy é uma ferramenta que contém o princípio da dualidade e assim é muito utilizada no apoio a decisão, ou seja, um elemento pode pertencer a um determinado conjunto de dados com certo grau e, concomitantemente, a outro com outro grau (CAMPOS FILHO, 2014). Originou-se como uma teoria alternativa para se trabalhar com conjuntos, sendo mais flexível, possível atender necessidades mais parecidas com a realidade. Esta teoria permite realizar a transição de pertinência de forma mais lenta e gradual, e não abrupta como na teoria usual de conjuntos. Lógica Fuzzy pode ser chamada de lógica nebulosa ou difusa, recebe este nome por existir uma área nebulosa, onde os valores passam por uma transição (BILOBROVEC *et al.*, 2004).

O sistema de interferência Fuzzy possui vários benefícios, dentre eles, maior generalidade, maior poder expressivo, maior capacidade para modelar problemas do mundo real, e, por fim, uma metodologia para explorar a tolerância para imprecisão. Além disso, a lógica Fuzzy pode ajudar a conseguir rastreabilidade, robustez e menor custo de solução. Ao contrário da lógica booleana que admite valores binários, a lógica Fuzzy admite que um elemento pode pertencer a um ou mais conjuntos Fuzzy com determinados graus de pertinência (HOFFMANN *et al.*, 2016).

A utilização de lógica Fuzzy permite trabalhar com imprecisões, utilizando variáveis reais, estas variáveis podem ser temperatura, umidade, altura etc. Para manipulação dessas variáveis são usados termos linguísticos como quente, esquentando, moderado, esfriando, frio,

entre outros. Estes termos podem ser utilizados para uma variável de temperatura por exemplo. Por isso, a logica Fuzzy tornou-se um grande aliado em soluções para sistemas de controle (BILOBROVEC et al, 2004).

Quando se considera todos os elementos de um conjunto, tem-se as funções de pertinência, por meio das quais, tem-se o grau de pertinência de cada elemento (SOUSA JÚNIOR, 1999). Elas se assemelham às funções de probabilidade, que descrevem a probabilidade relativa de uma variável de tomar certo valor. Porém, há diferenças conceituais bastante expressivas, principalmente nas regras de combinação das funções de pertinência. Além disso, a noção de um conjunto nebuloso é completamente não estatística por natureza (ZADEH, 1965).

As funções de pertinência podem assumir diversas formas: quadradas, retangulares e trapezoidais (estas podem levar a perda de informações em regiões onde sua inclinação é igual a 0), triangulares ou da forma-S (esta última que é uma forma mais suaves e reduz a perda de informações), entre outras (NELLES, 2001).

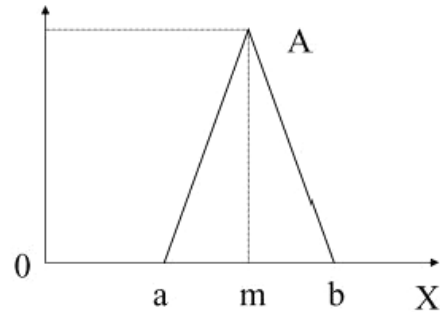
Alguns exemplos de funções de pertinências e respectivos equacionamentos estão ilustradas na

Figura 3 (Nucci, 2007). Pode-se observar que as funções de pertinência do tipo triangular e trapezoidal apresentam quase a mesma característica, diferenciando-se apenas pelo fato da função triangular apresentar um pico de ponto máximo, enquanto a trapezoidal apresenta um intervalo quando considerado o máximo grau de pertinência igual a 1.

Figura 3. Exemplos e equações para cada tipo de função de Pertinência; (a) Triangular; (b) Trapezoidal e (c) Gaussiana (Nucci, 2007).

- Triangulares

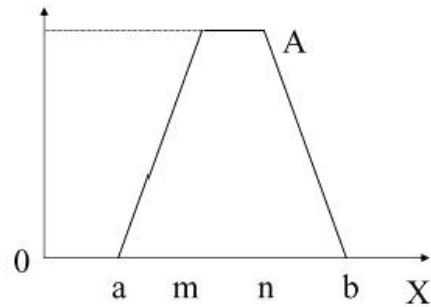
$$A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ (x-a)/(m-a), & \text{se } x \in [a,m] \\ (b-x)/(b-m), & \text{se } x \in [m,b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases}$$



(a)

- Trapezoidal

$$A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ (x-a)/(m-a), & \text{se } x \in [a,m] \\ 1, & \text{se } x \in [m,n] \\ (b-x)/(b-n), & \text{se } x \in [n,b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases}$$

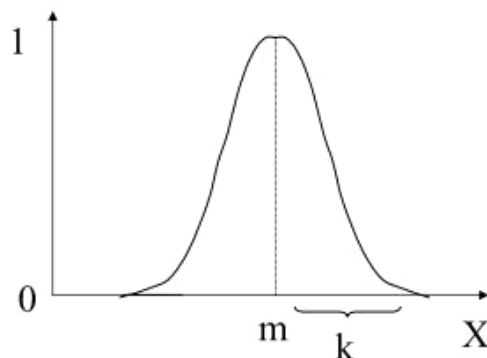


(b)

- Gaussiana

$$A(x) = e^{-k(x-m)^2}$$

onde $k > 0$



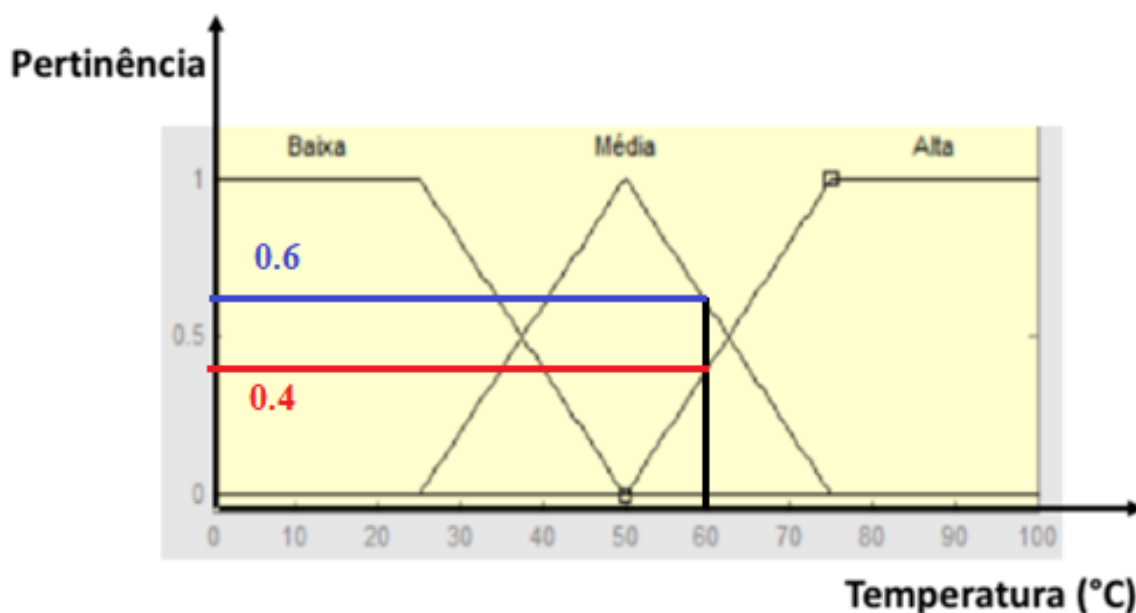
(c)

Outro conceito importante dentro da teoria da lógica nebulosa são as variáveis linguísticas. Enquanto na matemática clássica são utilizadas variáveis numéricas, a lógica nebulosa utiliza-se de variáveis linguísticas (variáveis cujos valores não são números, mas palavras ou expressões), por exemplo: temperatura, pressão, vazão etc. Isto decorre da

facilidade da utilização destes termos para expressão e processamento no formato de regras (NELLES, 2001; ZADEH, 1975).

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos Fuzzy. Por exemplo, a temperatura de um tanque industrial pode ser uma variável linguística admitindo valores baixa, média e alta. Estes valores são representados através de conjuntos Fuzzy, representados por funções de pertinência (utilizando funções triangulares e trapezoidais), como mostra a **Figura 4**. Neste caso, pode-se observar que a variável temperatura quando se considera o valor de 60°C, esta apresenta dois graus de pertinência diferentes, ou seja, quando se considera a variável linguística “Média”, o grau de pertinência tem um valor de 0,6, enquanto com a variável linguística “Alta”, o grau de pertinência atribuído tem um valor de 0.4.

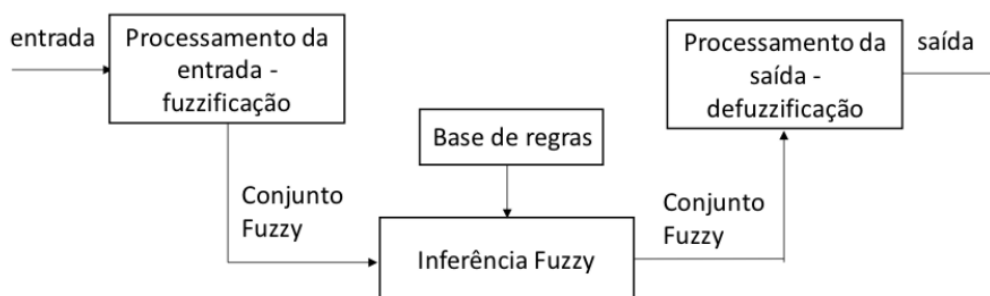
Figura 4. Funções de pertinência para a variável linguística temperatura (adaptado de HOFFMANN et al., 2016).



Dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas, pode existir diferentes formas para as funções de pertinência. Através da análise da **Figura 4**, tem-se por definições do usuário/especialista a utilização das funções de pertinências trapezoidais (baixa e alta) e triangular (média).

Para melhor entendimento do funcionamento do sistema de inferência Fuzzy, a **Figura 5** representa um sistema composto por quatro componentes: processamento da entrada (fuzzificação); a base de regras; a inferência Fuzzy, e; o processamento de saída (defuzzificação).

Figura 5. Funcionamento do sistema de inferência Fuzzy (HOFFMANN et al., 2016).



Segundo a **Figura 5**, a fuzzificação ou o processamento da entrada significa agregar incerteza realista a conjuntos clássicos. Nessa etapa os conjuntos ordinários (*crisp sets*) são transformados em conjuntos Fuzzy, essa transformação é feita por meio da junção das funções de pertinência com os elementos originais (valores numéricos). A base de regras Fuzzy é constituída por um conjunto de várias regras Fuzzy. Toda regra possui um antecedente e um consequente, e são representados do tipo “SE - ENTÃO”. As bases de regras estão diretamente associadas ao problema em si a ser modelado. A inferência Fuzzy é a etapa de combinação dos graus de pertinência por meio de uma base de regras previamente definidas. Na defuzzificação, ou processamento da saída o conjunto Fuzzy é transformado em um elemento do universo de discurso (geralmente, números reais), ou seja, é o processo inverso da fuzzificação (HOFFMANN *et al*, 2016).

Dentre os métodos de defuzzificação, destacam-se os seguintes;

→ Média dos Máximos: Este método (MoM) modifica a saída Fuzzy em saída discreta mostrando o *core* do conjunto Fuzzy ao qual o elemento condiz com maior grau de pertinência. Caso o valor máximo não for único, pondera-se o ponto central do intervalo de cores.

→ Centro dos Máximos: Este método (CoM) altera a saída Fuzzy em saída discreta resultando a média aritmética ponderada entre os *cores* dos conjuntos Fuzzy às quais o elemento refere-se, ponderadas pelo grau de pertinência.

→ Centro de Gravidade: Este método (CoA) modifica a saída Fuzzy em saída discreta encontrando a média aritmética entre os centros de gravidade dos conjuntos Fuzzy aos quais o elemento pertence, ponderados pelo grau de pertinência. Como desvantagem principal desse método, tem-se que ele é difícil de se aplicar em situações em que há funções complexas, pois o centroide das áreas não é facilmente encontrado e uma vez que este método também negligência a sobreposição de áreas.

3.7. APLICAÇÃO DO SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO EM PROCESSOS

Uma aplicação bem-sucedida do controle Fuzzy foi na produção de Cafalosporina C, descrita por Sousa (1999). Este antibiótico pode ser produzido utilizando o fungo *Cefalosporium acremonium* e só ocorre sob altas concentrações de glicose (quando a metionina é reprimida). O cultivo do *C. acremonium* é realizado em duas fases distintas: a primeira é caracterizada pelo crescimento do microrganismo (com abundância da fonte de carbono) e a segunda é caracterizada pela alimentação suplementar (promovendo a síntese de enzimas específicas que catalisam a produção do antibiótico). A estratégia de controle foi baseada na observação de que o fim da trofófase há uma transição entre a liberação crescente de gás carbônico e a liberação decrescente (caracterizando um ponto de máximo). O sistema de controle foi implementado em 3 níveis: “Atenção”, “Ação” e “Proteção”. Para o primeiro nível de controle (nível de Atenção) foram definidas duas variáveis linguísticas: “tempo” e “nível de saturação de gás carbônico”. Os valores linguísticos adotados para cada uma das variáveis linguísticas foram: “cedo”, “tarde” e “baixo”, “alto”, respectivamente. Foram criadas 4 regras nebulosas e a resposta foi a ativação ou não do nível de ação. Para o segundo nível de controle (Nível de Ação) foi utilizada apenas uma variável linguística, “variação de CO₂”, com dois valores linguísticos: “negativa” e “zero ou positiva”. Foram criadas duas regras nebulosas e a resposta do sistema foi a alimentação ou não do meio suplementar. Para o terceiro nível de controle (Nível de Proteção) foram definidas duas variáveis linguísticas: “tempo” e “nível de variação de CO₂”. Os valores linguísticos adotados para cada uma das variáveis linguísticas foram: “cedo”, “tarde” e “Positiva”, “Negativa”, respectivamente. Foram criadas 4 regras nebulosas e a resposta foi a confirmação ou o cancelamento da alimentação. Foram realizados três cultivos de *C. acremonium* em biorreator. Os dois primeiros permitiram estabelecer as funções de pertinência e a base de regras do controlador. O terceiro foi utilizado para testar a viabilidade e a robustez do algoritmo. Os resultados se apresentaram de maneira eficiente, obtendo-se um controlador eficaz na detecção do momento ótimo em que se deve iniciar a alimentação do meio suplementar (SOUSA JÚNIOR, 1999; SOUSA; ALMEIDA, 2001).

Nucci e colaboradores (2005) desenvolveram um algoritmo baseado na lógica nebulosa para determinação do momento de máxima concentração de enzimas durante um cultivo de *Bacillus megaterium* em um biorreator tipo tanque agitado. A Penicilina G-Acilase (PGA) é uma enzima industrial utilizada principalmente como biocatalizador na produção de antibióticos. O microrganismo *B. megaterium* produz a PGA e secreta-a no meio, o que simplifica os processos de separação e purificação. Durante o processo produtivo da enzima, a

fração molar do CO_2 atinge um nível máximo. Concidentemente, observou-se que a concentração enzimática também atinge seu ponto de máximo no mesmo momento. Assim, foi desenvolvido um sistema de lógica nebulosa, baseado no trabalho de Sousa (1999), para identificar o momento em que ocorre esse pico (reduzindo os custos do processo e evitando a degradação do produto). O algoritmo Fuzzy foi escrito em linguagem FORTRAN, compilado e implementado na plataforma Visual Basic (Microsoft). Assim como em Sousa (1999), o controle foi implementado em 3 níveis: “Atenção”, “Identificação do Pico” e “Proteção”. Para o primeiro nível de controle 58 (Nível de Atenção) foram definidas duas variáveis linguísticas: “tempo” e “fração molar de CO_2 ”. Os valores linguísticos adotados para cada uma das variáveis linguísticas foram: “cedo”, “tarde” e “baixo”, “alto” (respectivamente). Foram criadas 4 regras nebulosas e a resposta foi a ativação ou não do nível de identificação do pico. Para o segundo nível de controle (Nível de Identificação do pico) foi utilizada apenas uma variável linguística, “variação de CO_2 ”, com dois valores linguísticos: “negativa” e “zero ou positiva”. Foram criadas duas regras nebulosas e a resposta do sistema foi a notificação ou não do pico. Para o terceiro nível de controle (Nível de Proteção) foram definidas duas variáveis linguísticas: “tempo” e “variação de CO_2 ”. Os valores linguísticos adotados para cada uma das variáveis linguísticas foram: “cedo”, “tarde” e “Positiva”, “Negativa” (respectivamente). Foram criadas 4 regras nebulosas e a resposta foi a confirmação ou o cancelamento do pico. Três experimentos foram realizados para obtenção dos dados e ajuste dos parâmetros do controlador nebuloso. Em seguida, outros três cultivos foram realizados para validação e testes de robustez do controlador. Os resultados mostraram que o controlador Fuzzy identificou, com precisão, a região de máxima concentração de enzimas. Nos testes de robustez os resultados também foram positivos. O algoritmo forneceu estimativas de tempo para a máxima atividade enzimática dentro de uma faixa experimental correta (NUCCI, 2007).

Neto e colaboradores (2022) utilizaram a lógica fuzzy para realizar simulações de parâmetros de um Reator Nuclear. Por meio da Lógica Fuzzy foi possível realizar uma estimativa numérica em relação aos percentuais de nêutrons no reator. Com essa análise, foi determinado que aproximadamente 60% de nêutrons devem ser emitidos pela fonte primária no Reator e 41% de nêutrons que devem ser absorvidos pelos moderadores para manter a segurança desse Reator (NETO et al., 2022).

3.8. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Nesta seção serão abordadas as ferramentas computacionais utilizadas nesta dissertação: INFUZZY e Scilab®.

3.8.1. INFUZZY

InFuzzy é uma ferramenta destinada à modelagem de sistemas difusos (*Fuzzy Logic*). A modelagem de sistemas difusos é realizada através de interface gráfica de fácil manuseio, respeitando regras de ergonomia e usabilidade de *software*. As principais funcionalidades do sistema estão relacionadas a definição de variáveis de entrada, variáveis de saída, termos linguísticos, blocos de regras, relações entre variáveis e blocos de regras, simulações, integração com aplicações externas, personalização por projeto difuso (POSSELT et al., 2011).

A **Figura 6** apresenta a tela de construção de um projeto, sendo a tela mais importante do sistema, pois é por meio desta que ocorrem todas as manipulações sobre as variáveis de entrada, saída e bloco de regras.

Por meio da **Figura 6**, têm-se a seguinte estrutura: 1) Identificação do projeto; 2) Definição das funções utilizadas no modelo difuso; 3) Estrutura do projeto; 4) Barra de ferramentas; e os itens 5), 6) e 7) representam a Estrutura do projeto modelado, onde neste caso, são cinco variáveis de entrada, um bloco de regras e uma saída, respectivamente.

Figura 6. Tela de controle sobre o projeto Fuzzy (adaptado de POSSELT et al., 2015).

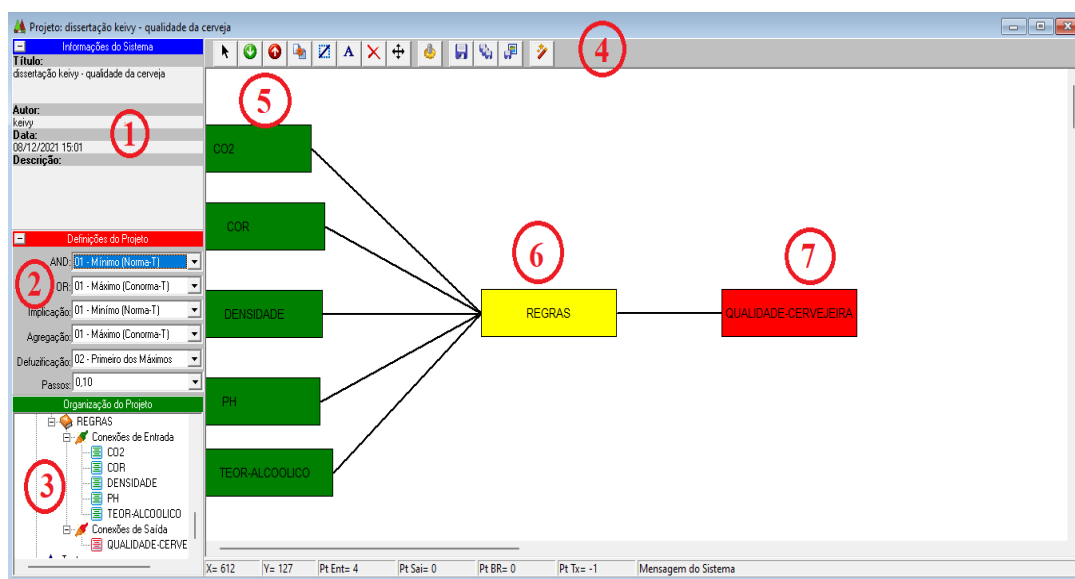


Figura 7 representa a tela de configuração das variáveis de entrada e saída. A tela está dividida a seguir: 1) definições das variáveis e universo; 2) termos linguísticos; 3) inclusão e edição de termos linguísticos e 4) representação gráfica dos termos linguísticos.

A apresenta a tela de definição das regras, sendo dividida da seguinte forma: 1) nome do bloco de regras; 2) definição dos termos linguísticos para cada variável de entrada; 3) definição do termo linguístico para cada variável de saída; 4) escolha do operador de conexão entre os antecedentes; 5) adição e edição das regras; 6) lista de regras definidas; 7) procedimento de exclusão e 8) pertinência das regras criadas.

Figura 7. Tela de edição das variáveis de entrada e saída (adaptado de POSSELT et al., 2015).



Figura 8. Tela de definição de regras (adaptado de POSSELT et al., 2015).

Propriedades do Bloco de Regras

Definições

Nome do Bloco Regras: REGRAS

Criar Regras Fuzzy

Antecedentes (SE)

CO2: Não

COR: Não

DENSIDADE: Não

PH: Não

Consequentes (ENTÃO)

QUALIDADE-CERVEJE: Não

Conexão

AND

OR

Adicionar Regra

Editar Regra

No	Se	Antecedentes	Então	Consequentes
1	Se	(CO2 = IDEAL) AND (COR = AMARELO-OURO) AND (DENSIDADE = IDEAL) AND (PH = IDEAL) AND (TEOR-ALCOOLICO = IDEAL)	Então	(QUALIDADE-CERVEJEIRA = APROVADA)
2	Se	(CO2 = ALTO) AND (COR = AMARELO-OURO) AND (DENSIDADE = IDEAL) AND (PH = IDEAL) AND (TEOR-ALCOOLICO = IDEAL)	Então	(QUALIDADE-CERVEJEIRA = APROVADA-COM-ALTERACOES)
3	Se	(CO2 = IDEAL) AND (COR = Não AMARELO-OURO) AND (DENSIDADE = IDEAL) AND (PH = IDEAL) AND (TEOR-ALCOOLICO = IDEAL)	Então	(QUALIDADE-CERVEJEIRA = APROVADA-COM-ALTERACOES)
4	Se	(CO2 = IDEAL) AND (COR = AMARELO-OURO) AND (DENSIDADE = IDEAL) AND (PH = ALTO) AND (TEOR-ALCOOLICO = IDEAL)	Então	(QUALIDADE-CERVEJEIRA = APROVADA-COM-ALTERACOES)
5	Se	(CO2 = BAIXO) AND (COR = AMARELO-OURO) AND (DENSIDADE = IDEAL) AND (PH = IDEAL) AND (TEOR-ALCOOLICO = IDEAL)	Então	(QUALIDADE-CERVEJEIRA = REPROVADA)
6	Se	(CO2 = IDEAL) AND (COR = AMARELO-OURO) AND (DENSIDADE = Não IDEAL) AND (PH = IDEAL) AND (TEOR-ALCOOLICO = IDEAL)	Então	(QUALIDADE-CERVEJEIRA = REPROVADA)
7	Se	(CO2 = IDEAL) AND (COR = AMARELO-OURO) AND (DENSIDADE = IDEAL) AND (PH = BAIXO) AND (TEOR-ALCOOLICO = IDEAL)	Então	(QUALIDADE-CERVEJEIRA = REPROVADA)
8	Se	(CO2 = IDEAL) AND (COR = AMARELO-OURO) AND (DENSIDADE = IDEAL) AND (PH = IDEAL) AND (TEOR-ALCOOLICO = Não IDEAL)	Então	(QUALIDADE-CERVEJEIRA = REPROVADA)
9	Se	(CO2 = BAIXO) OR (DENSIDADE = Não IDEAL) OR (PH = BAIXO)	Então	(QUALIDADE-CERVEJEIRA = REPROVADA)

Excluir Regra

Excluir Todas as Regras

Salvar

Cancelar

3.8.2. SCILAB®

O *software* Scilab®, desenvolvido pelas empresas francesas INRIA e ENPEC como uma alternativa ao Matlab®, com poder computacional que vai desde o cálculo numérico ao processamento de sinal e *design* de sistemas de controle, é disponibilizado como *software* de licença livre, permitindo ao usuário ter acesso ao seu código fonte e alterá-lo da melhor forma que se adapte às suas necessidades, tudo isso de forma totalmente gratuita (SILVA et. al, 2018).

O desenvolvimento do sistema de apoio de decisão (que envolve o estabelecimento das variáveis linguísticas, das funções de pertinência e das regras de controle) foi feito por meio do *Fuzzy Logic System* (FLS), que pertence ao *Fuzzy Logic toolbox* do Scilab®. O toolbox prevê um conjunto de funções e aplicações para análise, design e simulação de sistemas baseados na lógica nebulosa. Ele permite a modelagem de sistemas de comportamento complexo que se utilizam de regras lógicas simples, para assim implementá-las em um sistema de inferência nebulosos.

O *Fuzzy Logic System* (FLS) possui ferramentas gráficas para construir, editar e visualizar sistemas de inferência nebulosos. Estas ferramentas são compostas por um painel para edição e outro de visualização. O primeiro grupo é composto pelas ferramentas: *Fuzzy*

Logic Designer, *Membership Function Editor* e *Rule Editor*. O segundo conjunto é composto pelo *Surface Viewer*. Elas estão dinamicamente interligadas, ou seja, quaisquer alterações pelas ferramentas de edição serão refletidas nas ferramentas de visualização.

Fuzzy Logic Designer: lida com questões importantes para o sistema tais como: número de variáveis de entrada e saída, nomenclaturas, escolha do método de agregação e deFuzzyficação e o tipo de sistema nebuloso (Mandani ou Takagi-Sugeno). É importante ressaltar que o *Fuzzy Logic Designer* (**Figura 9**) não limita o número de entradas (condicionado apenas à memória disponível no hardware).

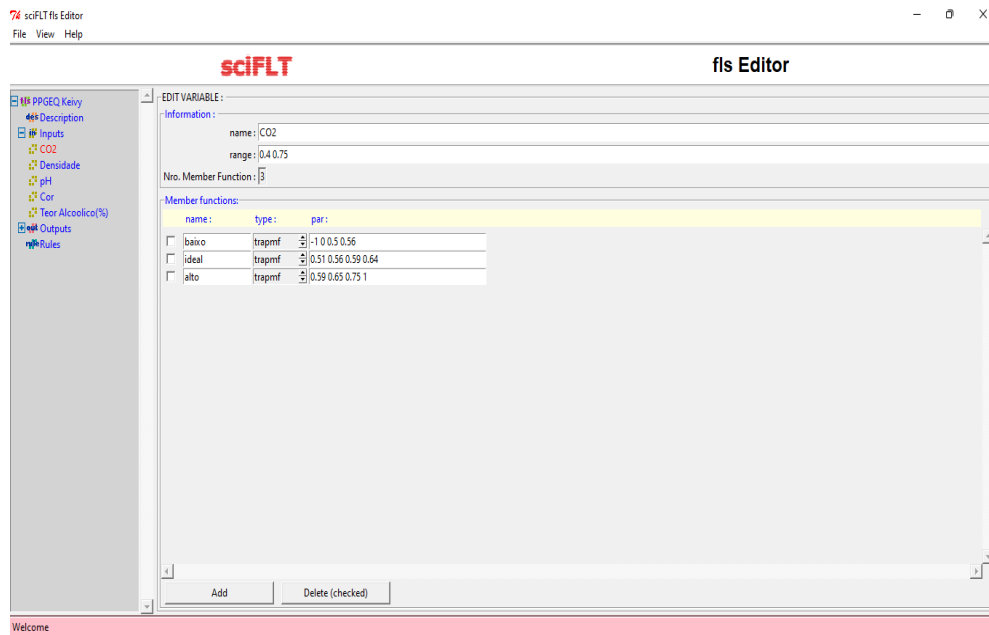
Membership Function Editor: é uma ferramenta de edição das funções de pertinência. Ela permite ao usuário incluir, excluir, editar e visualizar todas as funções de pertinência relacionadas tanto às entradas quanto às saídas.

É possível determinar os limites superior e inferior (ranges) das funções de pertinência, nomeá-las, escolher o tipo de função – dentre elas destacam-se as triangulares (trimf), trapezoidais (trapmf), gaussianas (gaussmf1 e gaussmf2), em forma de sino (gbellmf), sigmodais (sigmf, dsigmf, psigmf) e polinomiais (zmf, smf, pimf) – e seus parâmetros. O programa também permite ao usuário que ele crie suas próprias funções de pertinência (custmf). O *Membership Function Editor* é mostrado na **Figura 10**.

Figura 9. *Fuzzy Logic Designer* (Próprio Autor).

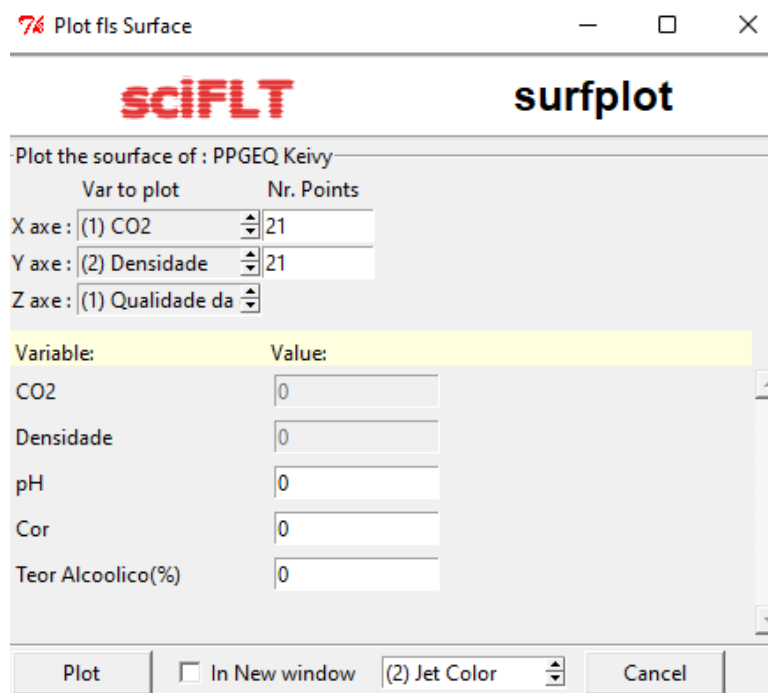


Figura 10. Membership Function Editor (Próprio Autor).



Rule Editor: é uma ferramenta que lida com a edição, inclusão ou exclusão de regras que determinam o comportamento do sistema. Sua interface é intuitiva e permite ao usuário criar regras (e modificá-las) escolhendo as variáveis linguísticas a partir de uma lista. O editor também possui duas opções extras: *None* e *Not*. A primeira é para excluir determinada variável da regra. Já a segunda é para negar determinada qualidade (ou seja, o conjunto complementar). Também é possível atribuir pesos (valores entre 0 e 1) a determinadas regras. Se nada for especificado, assume-se que o peso é igual a 1.

Surface Viewer: é uma ferramenta utilizada para avaliar a dependência de uma saída em relação a duas variáveis de entrada, através de gráficos de superfície (**Figura 11**).

Figura 11. *Surface Viewer* (Próprio Autor).

4. METODOLOGIA

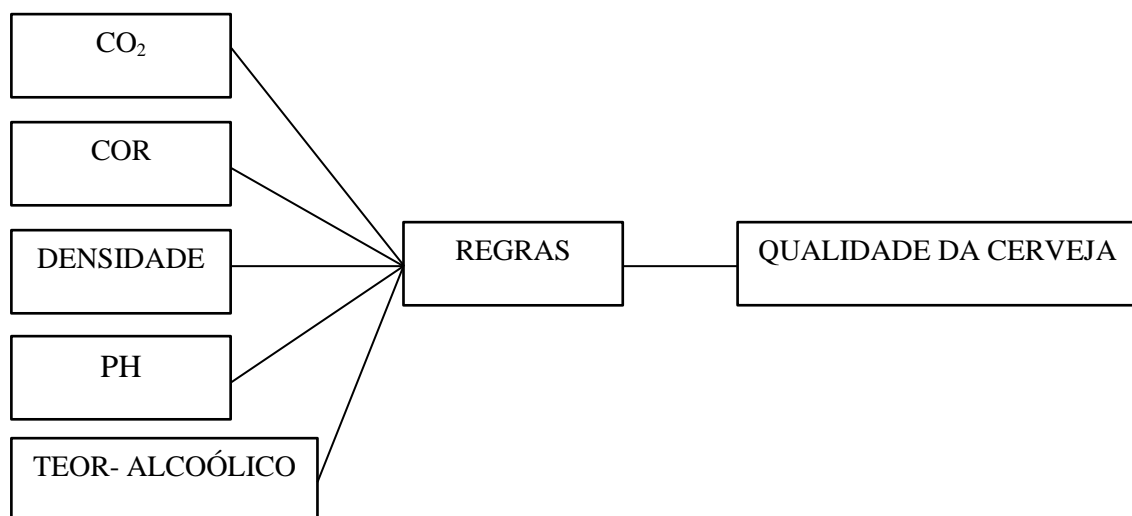
O sistema de apoio de decisão utilizando a lógica Fuzzy foi desenvolvido utilizando o *toolbox* de lógica nebulosa do Scilab® e suas ferramentas, bem como o software INFUZZY. Vale ressaltar que ambos os softwares apresentam características de serem livres.

Para realização deste trabalho, primeiramente foi feita uma análise das variáveis que influenciam nas características da cerveja Pilsen e portanto em sua avaliação sensorial. O segundo sistema Fuzzy foi desenvolvido identificando principalmente as características e informações que são significativas na determinação do estilo de algumas cervejas (Pilsen Alemã, American IPA, Stout Americana e a Cerveja de trigo Alemã). Muitas destas informações foram obtidas por meio do trabalho de HOFFMANN *et al*, 2016.

4.1. SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO PARA AVALIAR A QUALIDADE DA CERVEJA PILSEN

Para o desenvolvimento do sistema de apoio de decisão, com o objetivo de avaliar a qualidade da cerveja Pilsen, foram utilizadas as variáveis de entrada CO2, Cor, Densidade, pH e Teor alcoólico (*Figura 12*).

Figura 12. Fluxograma do programa para a avaliação da qualidade das cervejas (Próprio Autor).



Várias funções de pertinências foram testadas para encontrar a melhor disposição entre elas e os melhores resultados estão descritas na **Tabela 2**, bem como o intervalo de cada variável de entrada, termo linguístico e os parâmetros de cada termo utilizado. O mesmo raciocínio foi utilizado na construção do sistema Fuzzy no *Software Scilab*^(R) (**Tabela 3**).

Tabela 2. Variáveis, intervalo, termos linguísticos, funções de pertinência e parâmetros utilizados na construção do Sistema **INFUZZY** para avaliação da qualidade da cerveja (Próprio Autor).

Sistema INFUZZY				
Variáveis	Intervalo	Termo linguístico	Funções de Pertinência	Parâmetros
CO₂ [mg/L]	[0,40 - 0,75]	Baixo	Rampa esquerda	[0,50; 0,56]
		Ideal	Trapézio	[0,51; 0,56; 0,59; 0,64]
		Alto	Rampa direita	[0,59; 0,65]
Cor	[0,0 - 8,0]	Palha	Inclinação esquerda	[3,0]
		Amarelo-ouro	Trapézio	[2,0; 3,0; 5,0; 6,0]
		Ambar	Inclinação direita	[5,0]
Densidade [mg/ml]	[1.010 - 1.030]	Ideal	Rampa esquerda	[1.013; 1.016]
		Alta	Rampa direita	[1.013; 1.016]
pH	[3,4 - 5,2]	Baixa	Rampa esquerda	[3,60; 4,20]
		Ideal	Trapézio	[3,90; 4,20; 4,40; 4,70]
		Alta	Rampa direita	[4,40; 5,00]
Teor Alcoólico [%]	[3,0 - 7,0]	Baixo	Rampa esquerda	[3,97; 5,00]
		Ideal	Triangular	[3,97; 5,0; 6,03]
		Alta	Rampa direita	[5,0; 6,03]
Qualidade da cerveja	[0,0 - 10,0]	Reprovada	Inclinação esquerda	[5,0]
		Aprovada com Alteração	Triangular	[3,0; 5,0; 7,0]
		Aprovada	Inclinação direita	[5,0]

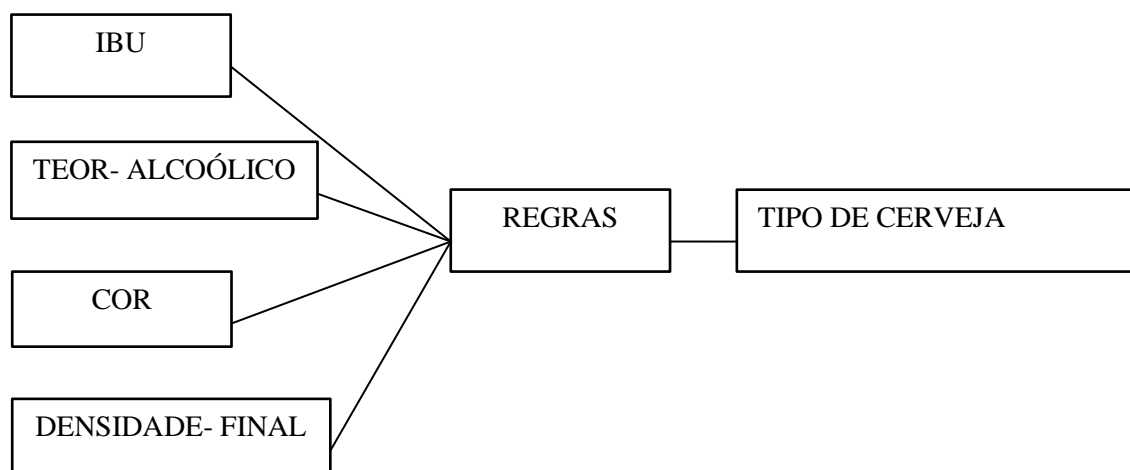
Tabela 3. Variáveis, intervalo, termos linguísticos, funções de pertinência e parâmetros utilizados na construção do Sistema *SCILAB*® para avaliação da qualidade da cerveja (Próprio Autor).

Sistema Scilab®				
Variáveis	Intervalo	Termo linguístico	Funções de Pertinência	Parâmetros
CO₂ [mg/L]	[0,40 - 0,75]	Baixo	Trapézio	[-1.0; 0.0 ;0.5 ;0.56]
		Ideal	Trapézio	[0.51 ;0.56 ;0.59 ;0.64]
		Alto	Trapézio	[0.59; 0.65 ;0.75 ;1.0]
Cor	[0,0 - 8,0]	Palha	Triangular	[-1.0; 0.0; 3.0]
		Amarelo-ouro	Trapézio	[2.0; 3.0; 5.0; 6.0]
		Ambar	Triangular	[5.0; 8.0; 9.0]
Densidade [mg/ml]	[1.010 - 1.030]	Ideal	Trapézio	[1.0; 1.005; 1.013; 1.016]
		Alta	Trapézio	[1.011; 1.016; 1.030; 1.031]
pH	[3,4 - 5,2]	Baixa	Trapézio	[-1.0; 0.0; 3.6; 4.2]
		Ideal	Trapézio	[3.9; 4.2; 4.4; 4.7]
		Alta	Trapézio	[4.4; 5.0; 6.0; 7.0]
Teor Alcoólico [%]	[3,0 - 7,0]	Baixo	Trapézio	[-1.0; 0.0; 3.97; 5.0]
		Ideal	Triangular	[3,97; 5,0; 6,03]
		Alta	Trapézio	[5.0; 6.03; 7.0; 8.0]
Qualidade da cerveja	[0,0 - 10,0]	Reprovada	Triangular	[-1.0; 0.0; 4.0]
		Aprovada com Alteração	Triangular	[3,0; 5,0; 7,0]
		Aprovada	Triangular	[6.0; 10.0; 11.0]

4.2. SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO PARA AVALIAÇÃO DO ESTILO DE CERVEJA

O segundo sistema de apoio de decisão desenvolvido utilizou 4 variáveis de entrada (IBU, Teor alcoólico, Cor e Densidade final), como ilustrado na **Figura 13**, e como variável de saída foi avaliado o estilo de cerveja.

Figura 13. Fluxograma do programa para avaliação do tipo de cerveja (Próprio Autor).



Seguindo o mesmo raciocínio que descrito no item 4.1 deste Capítulo, várias funções de pertinências foram testadas para encontrar a melhor disposição entre elas e os melhores resultados estão descritas na **Tabela 4**, bem como o intervalo de cada variável de entrada, termo linguístico e os parâmetros de cada termo utilizado. Vale ressaltar, que como o objetivo era classificar os tipos de cerveja, foi utilizado somente o *software* INFUZZY, que apresenta resultados numéricos ao contrário do Scilab®, que apresenta uma superfície de resposta.

Tabela 4. Variáveis, intervalo, termos linguísticos, funções de pertinência e parâmetros utilizados na construção do Sistema INFUZZY para identificar os tipos de cerveja.

Sistema INFUZZY				
Variáveis	Intervalo	Termo linguístico	Funções de Pertinência	Parâmetros
IBU	[5,0 - 80,0]	Cerveja de trigo alemã	Trapézio	[5,0; 8,0; 15,0; 20,0]
		Pilsen alemã	Trapézio	[17,0; 22,0; 40,0; 45,0]

		Stout americana	Trapézio	[30,0; 35,0; 75,0; 80,0]
		American IPA	Trapézio	[35,0; 40,0; 40,0, 45,0]
		Cerveja de trigo alemã	Trapézio	[3,80; 4,30; 5,60; 6,10]
		Pilsen alemã	Trapézio	[3,90; 4,40; 5,20; 5,70]
Teor alcoólico [%]	[0,0 - 8,0]	Stout americana	Trapézio	[4,50; 5,0; 7,0; 7,50]
		American IPA	Trapézio	[5,0; 5,50; 7,50; 8,0]
		Cerveja de trigo alemã	Trapézio	[1,0; 2,0; 6,0; 7,0]
Cor	[0,0 - 8,0]	Pilsen alemã	Trapézio	[1,0; 2,0; 5,0; 6,0]
		Stout americana	Trapézio	[21,0; 30,0; 40,0; 41,0]
		American IPA	Trapézio	[5,0; 6,0; 14,0; 22,0]
		Cerveja de trigo alemã	Trapézio	[1.008; 1.010; 1.014; 1.016]
Densidade final [mg/ml]	[1.006 - 1.024]	Pilsen alemã	Trapézio	[1.006; 1.008; 1.013; 1.015]
		Stout americana	Trapézio	[1.009; 1.010; 1.020; 1.024]
		American IPA	Trapézio	[1.006; 1.007; 1.015; 1.016]
		Cerveja de trigo alemã	Triangular	[6,0; 7,0; 8,0]
Tipos de cerveja	[0,0 - 8,0]	Pilsen alemã	Triangular	[2,0; 3,0; 4,0]
		Stout americana	Triangular	[4,0; 5,0; 6,0]
		American IPA	Triangular	[0,0; 1,0; 2,0]
		Cerveja de trigo alemã	Triangular	[6,0; 7,0; 8,0]

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

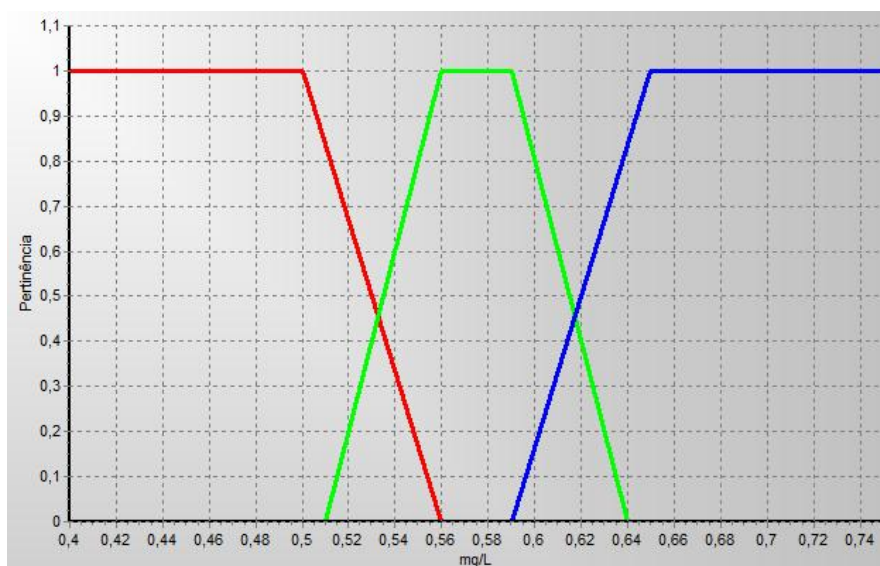
5.1. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA CERVEJA PILSEN

5.1.1. SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO UTILIZANDO SOFTWARE INFUZZY

Nas **Figura 14** a **Figura 18**, são ilustradas as funções inseridas no programa de avaliação da qualidade da cerveja. Segundo HOFFMANN *et al.* (2016), para uma cerveja possuir uma qualidade ideal para o consumo esta deve possuir os seguintes valores para cada uma das variáveis estudadas:

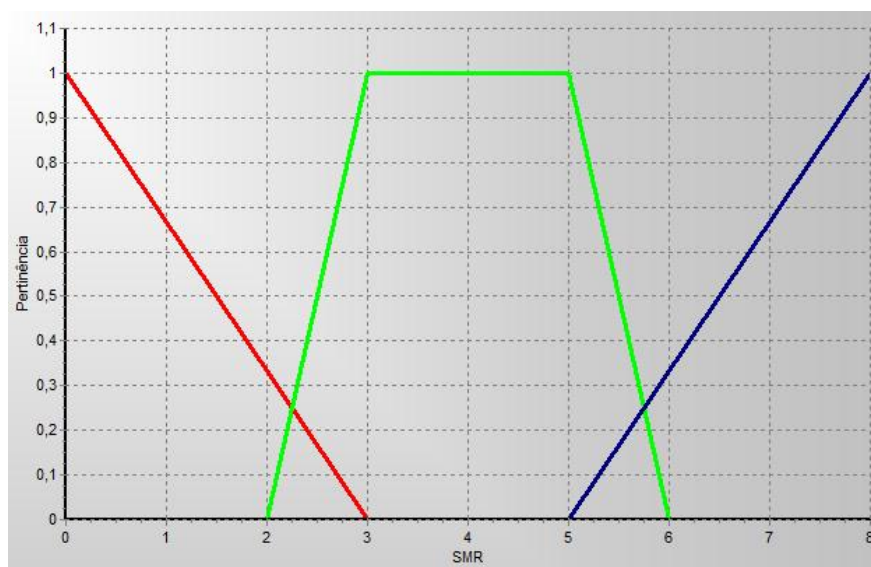
- CO₂ deve estar entre 0,55 e 0,60 mg. L⁻¹ (Figura 14, variável linguística “Ideal”), isso porque para valores abaixo de 0,55 mg. L⁻¹ a cerveja sofre um baixo índice de carbonatação comprometendo assim a formação do colarinho no momento do consumo (Figura 14, variável linguística “Baixa”). No entanto, para valores superiores a 0,60 mg. L⁻¹ a armazenagem da bebida sofre comprometimento, pois a tampa da garrafa pode vir a estourar (Figura 14, variável linguística “Alta”).

Figura 14. Representação gráfica da variável linguística CO₂ e suas funções de pertinência.
(-) baixo; (-) ideal; (-) alto (Próprio Autor).



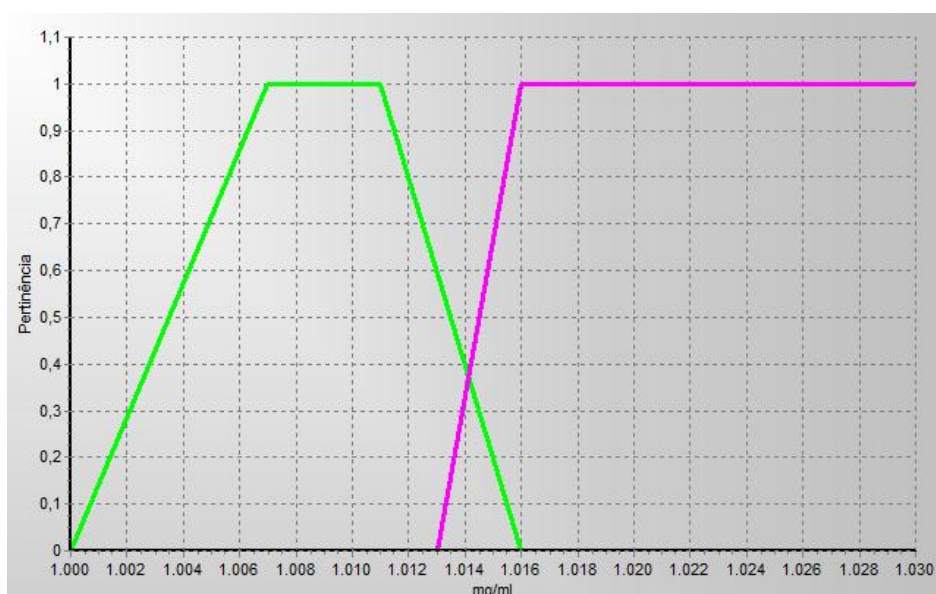
- Cor da cerveja, especificamente se tratando da Pilsen Alemã deve possuir uma variação na cor entre 2 e 5 SRM segundo BJCP (Figura 15, variável linguística “Amarelo”) e por ser um tipo de cerveja de cor clara deve obter pelo menos 20 EBC;

Figura 15. Representação gráfica da variável linguística cor e suas funções de pertinência.
 (-) Palha; (-) Amarelo ou Ouro; (-) Âmbar (Próprio Autor).



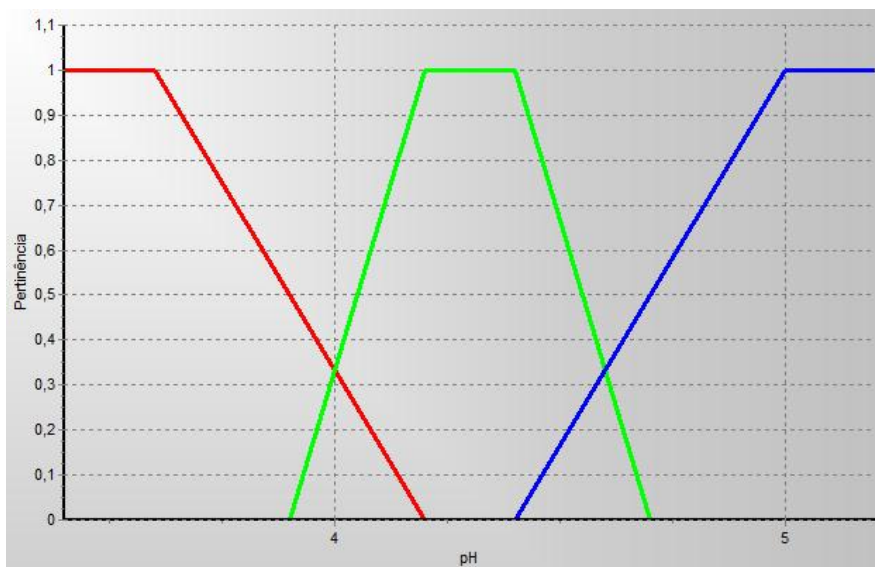
- Densidade da cerveja, novamente tomando como parâmetro a cerveja Pilsen Alemã, deve estar entre 1,008 e 1,013 g/mL (Figura 16, variável linguística “Ideal”). Para valores maiores que 1,013 g/mL (Figura 16, variável linguística “Alta”) a cerveja apresenta característica pesada, não satisfazendo o tipo de cerveja em questão. E para valores abaixo de 1,008 g/mL torna-se difícil atingir no processo produtivo;

Figura 16. Representação gráfica da variável linguística densidade e suas funções de pertinência, (-) Ideal; (-) Alta (Próprio Autor).



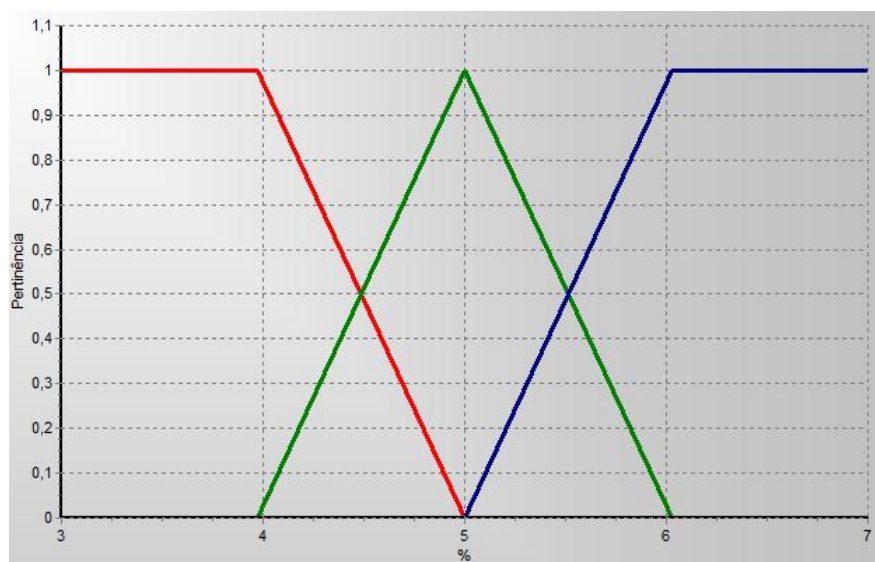
- O pH é uma variável muito significativa, que pode propiciar sabores desagradáveis no produto quando está fora do padrão (Figura 18, variáveis linguísticas “Baixo” e “Alto”), ou seja, deve possuir valores entre 4 e 4,6; sendo indicado como ideal valores entre 4,2 e 4,4 (Figura 17, variável linguística “Ideal”);

Figura 17. Representação gráfica da variável linguística pH e suas funções de pertinência. (-) baixo; (-) ideal; (-) alto (Próprio Autor).



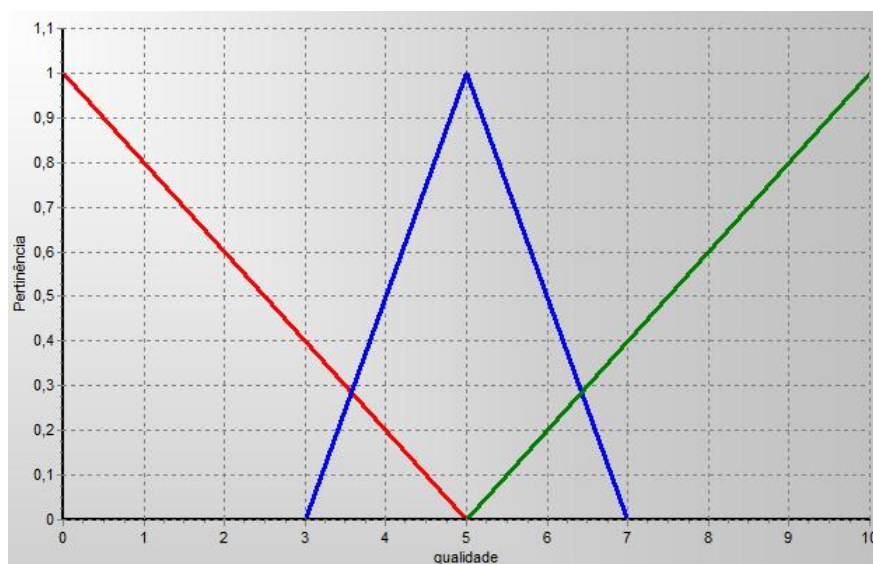
- Teor alcoólico é recomendado um valor de 5% (Figura 18, variável linguística “Ideal”), porém as normas vigentes permitem uma variação entre 4,5% e 5,5%. Fora destes valores, será considerado com valor de teor alcoólico “Baixo” ou “Alto”.

Figura 18. Representação gráfica da variável linguística teor alcoólico e suas funções de pertinência. (-) baixo; (-) ideal; (-) alto (Próprio Autor).



Em relação a variável linguística qualidade da cerveja, foi atribuído que valores maiores que 5,0 seria “Aprovada”, entre 3,0 e 7,0 “Aprovada com alterações” e valores menores 5,0 seria “Reprovada”. Suas respectivas funções estão representadas na **Figura 19**.

Figura 19. Representação gráfica da variável linguística qualidade da cerveja e suas funções de pertinência. (-) Reprovada; (-) Aprovada com alterações; (-) Aprovada (Próprio Autor).



Seguindo o fluxograma ilustrado na **Figura 12** ilustrado anteriormente, foi criada uma base de regras, em que por meio da análise da lógica Fuzzy têm-se como resposta a Qualidade da cerveja Pilsen, ou seja, se a cerveja está aprovada ou não para o consumo.

O banco de regras está apresentado na **Tabela 5**, totalizando um somatório de 9 regras no geral, sendo que, se considerasse as variações linguísticas de cada variável e fosse feita todas as possíveis combinações, totalizaria um valor de $3 \times 3 \times 2 \times 3 \times 3 = 162$ regras. Porém, como forma de otimizar a programação e por meio do conhecimento do especialista no processo, foi possível diminuir consideravelmente o número de regras, de forma que abrangesse todo o universo estudado em questão.

Ressaltando que as regras foram formadas pelos seguintes conectivos, exemplo:

SE CO₂= Ideal E Cor= Amarelo-Ouro E Densidade= Ideal E pH= Ideal E Teor Alcoólico= Ideal ENTÃO Qualidade da Cerveja= Aprovada.

Exceto para última regra em que foi substituído E pelo OU ficando representada da seguinte forma; SE CO₂= Baixo OU Densidade= Não Ideal OU pH= Baixo ENTÃO Qualidade da Cerveja= Reprovada.

Tabela 5. Base de regras proposta para avaliação da qualidade das cervejas (Próprio Autor).

VARIÁVEIS					SAÍDA
CO ₂	COR	DENSIDADE	pH	TEOR ALCOÓLICO	QUALIDADE DAS CERVEJAS
IDEAL	AMARELO-OURO	IDEAL	IDEAL	IDEAL	APROVADA
ALTO	AMARELO-OURO	IDEAL	IDEAL	IDEAL	APROVADA COM ALTERAÇÕES
IDEAL	NÃO AMARELO-OURO	IDEAL	IDEAL	IDEAL	APROVADA COM ALTERAÇÕES
IDEAL	AMARELO-OURO	IDEAL	ALTO	IDEAL	APROVADA COM ALTERAÇÕES
BAIXO	AMARELO-OURO	IDEAL	IDEAL	IDEAL	REPROVADA
IDEAL	AMARELO-OURO	NÃO IDEAL	IDEAL	IDEAL	REPROVADA
IDEAL	AMARELO-OURO	IDEAL	BAIXO	IDEAL	REPROVADA
IDEAL	AMARELO-OURO	IDEAL	IDEAL	NÃO IDEAL	REPROVADA
BAIXO	-----	NÃO IDEAL	BAIXO	-----	REPROVADA

Após a construção dos sistemas de apoio de decisão nos Software INFUZZY e Scilab®, foram feitas simulações em condições ideais e em condições que se variava apenas umas das variáveis em estudo, para obtenção de possíveis conclusões sobre a influência de cada uma sobre a qualidade do produto e foi feita a observação do comportamento da variável saída para diferentes métodos de defuzzyficação.

Para início de inferências sobre os valores obtidos da variável saída nas simulações, observa-se que o método do centro de gravidade não apresentou altos valores de saída (máximo de 8,37) mesmo quando todos os parâmetros em estudo do sistema estavam nas condições ideais para aprovação, diferente como nos casos quando se utilizou os métodos de defuzzyficação Centro dos máximos (10,0) e Média dos máximos (10,0). Entretanto, vale ressaltar que pela função de pertinência de saída, ilustrada na **Figura 19**, para uma cerveja ser aprovada, os valores de saída teriam que seriam maiores que 5,0, entre aprovada com alteração e aprovada.

Deste modo, a **Tabela 6** ilustram as simulações realizadas variando o valor do Teor alcoólico e observando a influência desta variável com as demais.

Tabela 6. Simulação alterando os valores para variável teor alcoólico e para o método de defuzzificação da variável saída (Próprio Autor).

VARIÁVEIS					SAÍDA → QUALIDADE DAS CERVEJAS		
CO ₂	COR	DENSIDADE	pH	TEOR ALCOÓLICO	CENTRO DE GRAVIDADE	CENTRO DOS MÁXIMOS	MÉDIA DOS MÁXIMOS
0,57	3	1010	4,3	5	8,37	10	10
0,57	3	1010	4,3	3,8	1,63	0	0
0,57	3	1010	4,3	6,3	1,63	0	0
0,57	3	1010	4,3	4,5	5,07	8,8	8,8
0,57	3	1010	4,3	5,8	3,49	0,55	0,55
0,57	3	1010	4,3	4	1,95	0,05	0,05
0,57	3	1010	4,3	7	1,63	0	0

É possível perceber que o teor alcoólico é muito importante para a qualidade da cerveja. Pois por meio das simulações representadas na **Tabela 6.**, pode-se observar que com uma pequena variação da idealidade dos valores do teor alcoólico, a qualidade da cerveja oscila bruscamente. Fato que também pode ser justificado por o produto não estar dentro das normas da legislação que por sua vez são rígidas aqui no Brasil. Pode-se destacar que quando se utilizou de valores baixos (3,8 %) e altos de teor alcoólico (6,3% e 7%), a qualidade da cerveja pilsen foi reprovada, resultados estes de acordo com os obtidos por HOFFMANN *et al.* (2016).

Várias simulações foram feitas variando o valor do CO₂ e verificando a qualidade da cerveja como resultado, e a **Tabela 7** traz estes resultados.

Conforme comentado anteriormente, a variação na carbonatação da cerveja influencia diretamente no seu armazenamento, de forma a tornar o engarrafamento mais seguro quando seu índice está na faixa de idealidade. Outro fator também considerável é deixá-la com um aspecto de borbulhamento, além de afetar diretamente na formação do colarinho, que por sua vez possui a função como uma camada isolante térmica para uma maior estabilidade da temperatura da bebida quando servida.

Tabela 7. Simulação alterando os valores para variável CO₂ e para o método de defuzzificação da variável saída (Próprio Autor).

VARIÁVEIS					SAÍDA → QUALIDADE DAS CERVEJAS		
CO ₂	COR	DENSIDADE	pH	TEOR ALCOÓLICO	CENTRO DE GRAVIDADE	CENTRO DOS MÁXIMOS	MÉDIA DOS MÁXIMOS
0,57	3	1010	4,3	5	8,37	10	10
0,4	3	1010	4,3	5	1,63	0	0
0,65	3	1010	4,3	5	5	5	5
0,72	3	1010	4,3	5	5	5	5
0,47	3	1010	4,3	5	1,63	0	0
0,55	3	1010	4,3	5	6,86	9,5	9,5
0,51	3	1010	4,3	5	1,68	0,4	0,4
0,63	3	1010	4,3	5	5,92	5	5
0,61	3	1010	4,3	5	7,17	9	9
0,58	3	1010	4,3	5	8,37	10	10

Dessa forma, com a análise da **Tabela 7** vê-se que essa variável também possui um intervalo de variação pequeno, ou seja, uma leve alteração pode tornar o produto inviável para o consumo, como por exemplo, quando se considerou valores de CO₂ não ideais (0,4 e 0,72 %) chegando a resultados da qualidade da cerveja entre 0 e 5 ou seja, uma cerveja considerada reprovada.

A **Tabela 8** ilustra os resultados obtidos na simulação no Software INFUZZY utilizando a variação dos valores de entrada da variável Densidade.

Ao simular valores fora do intervalo de idealidade, como pode se observar na **Tabela 8**, nota-se que a qualidade da cerveja diminui muito, isso pode ser justificado pelo fato dessa variável linguística estar correlacionada com a variável linguística teor alcoólico. Pois, durante a fermentação do mosto quanto maior a disponibilidade de açúcares, maior será a densidade e o tempo de fermentação. Consequentemente será obtido um teor alcoólico maior para o produto, sendo assim, temos a relação que quanto maior a densidade do mosto maior o

teor alcoólico, ou seja, são duas variáveis diretamente proporcionais. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por HOFFMANN *et al.* (2016) e NASCIMENTO (2019).

Tabela 8. Simulação alterando os valores para variável Densidade e para o método de defuzzificação da variável saída (Próprio Autor).

VARIÁVEIS					SAÍDA → QUALIDADE DAS CERVEJAS		
CO ₂	COR	DENSIDADE	pH	TEOR ALCOÓLICO	CENTRO DE GRAVIDADE	CENTRO DOS MÁXIMOS	MÉDIA DOS MÁXIMOS
0,57	3	1010	4,3	5	8,37	10	10
0,57	3	1014	4,3	5	5,87	9,2	9,2
0,57	3	1015	4,3	5	4,13	0,8	0,8
0,57	3	1000	4,3	5	8,37	10	10
0,57	3	1017	4,3	5	1,63	0	0
0,57	3	1025	4,3	5	1,63	0	0
0,57	3	1007	4,3	5	8,37	10	10
0,57	3	1013	4,3	5	8,37	10	10
0,57	3	1018	4,3	5	1,63	0	0

Seguindo o mesmo raciocínio, fez as simulações para o sistema de apoio de decisão para verificar a qualidade da cerveja variando agora os valores de entrada para pH e os resultados estão ilustrados na **Tabela 9**.

Analisando os dados obtidos com a variação do pH, tem-se que o pH é uma variável que deve ser controlada durante todo processo de fabricação das cervejas. Uma vez que, sua alteração pode acarretar diversos problemas, por exemplo durante a mosturação o pH inadequado, pode inibir a ação das enzimas que são muito particulares em relação a este fator. Além disso, durante a fermentação o desempenho das leveduras está intrinsecamente relacionado com faixa de pH, o que acarreta a variação das variáveis teor alcoólico e densidade caso não se tenha uma eficiente fermentação. Ressaltando ainda que um pH final inadequado da cerveja pode proporcionar uma cerveja azeda e turva, logo um produto inviável de se consumir. Pode-se observar que para valores de pH fora do ideal, os resultados

da qualidade da cerveja alteram consideravelmente, ou seja como se utilizou valores de pH de 3,6 e 5,2, a cerveja foi considerada reprovada e aprovada com alteração, respectivamente.

Tabela 9. Simulação alterando os valores para variável pH e para o método de defuzzificação da variável saída (Próprio Autor).

VARIÁVEIS					SAÍDA → QUALIDADE DAS CERVEJAS		
CO ₂	COR	DENSIDADE	pH	TEOR ALCOÓLICO	CENTRO DE GRAVIDADE	CENTRO DOS MÁXIMOS	MÉDIA DOS MÁXIMOS
0,57	3	1010	4,3	5	8,37	10	10
0,57	3	1010	4	5	5	5	5
0,57	3	1010	4,7	5	5	5	5
0,57	3	1010	3,6	5	1,63	0	0
0,57	3	1010	4,4	5	8,37	10	10
0,57	3	1010	5	5	5	5	5
0,57	3	1010	5,2	5	5	5	5
0,57	3	1010	4,5	5	7,66	9,2	9,2
0,57	3	1010	4,45	5	8,04	9,6	9,6
0,57	3	1010	4,65	5	5,99	5	5

Pode-se observar a diferença dos resultados quando se utilizou os métodos de defuzzificação Centro dos máximos e Média dos máximos com o centro da gravidade. Os dois primeiros critérios apresentam valores iguais entre si em todas as simulações.

Para finalizar a análise referente a qualidade da cerveja, simulações variando os valores de entrada para a o termo linguístico Cor e os resultados estão apresentados na **Tabela 10**.

A cor da cerveja está relacionada à qual tipo de malte foi utilizado para sua fabricação, ou seja, um malte mais torrado proporciona uma cerveja mais escura e assim vice-versa. Com isso, temos que a simulação foi feita para classificação de uma cerveja do tipo Pilsen Alemã, visto que esse tipo de cerveja possui um tom mais claro, por isso se justifica uma qualidade menor para valores fora do intervalo de idealidade citado anteriormente. Destaca-se também

que o fato da coloração da bebida proporcionar diferentes sabores, pois para adquirir uma coloração específica é necessários uma receita e um grau de torra do malte específico.

Tabela 10. Simulação alterando os valores para variável Cor e para o método de defuzzificação da variável saída (Próprio Autor).

VARIÁVEIS					SAÍDA → QUALIDADE DAS CERVEJAS		
CO ₂	COR	DENSIDADE	pH	TEOR ALCOÓLICO	CENTRO DE GRAVIDADE	CENTRO DOS MÁXIMOS	MÉDIA DOS MÁXIMOS
0,57	3	1010	4,3	5	8,37	10	10
0,57	2,7	1010	4,3	5	7,36	9,25	9,25
0,57	2	1010	4,3	5	5	5	5
0,57	4,8	1010	4,3	5	8,37	10	10
0,57	6,5	1010	4,3	5	5	5	5
0,57	7,3	1010	4,3	5	5	5	5
0,57	8	1010	4,3	5	5	5	5
0,57	3,3	1010	4,3	5	8,37	10	10
0,57	5,4	1010	4,3	5	7,06	9	9
0,57	5,9	1010	4,3	5	5,48	5	5

Deste modo, como comentado no início das simulações sobre os métodos de defuzzificação, é possível justificar os valores encontrados pela forma da análise de cada um. Já que, anteriormente foi comentado que o método do centro de gravidade não é indicado para sistemas mais complexos, sendo que a programação realizada envolve um sistema de cinco variáveis de entrada o que justifica essa complexidade. Além disso, pode ter ocorrido a sobreposição de áreas na variável saída para fundamentar a variação nos valores encontrados em relação aos outros dois métodos.

Quanto aos métodos de centro de máximos e média dos máximos, constata-se que os valores encontrados para variável saída em ambos foram os mesmos em todas as situações. Dessa forma, tem-se que ambos os métodos podem ser aplicados para o sistema em estudo e ressalta-se que a igualdade dos valores encontrados se dá pela forma como é feita a

defuzzificação, pois ambos estes métodos são o que mais se aproximam da forma como são tratados os dados obtidos.

5.1.2. SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO UTILIZANDO SOFTWARE Scilab®

Seguindo com o objetivo do sistema de apoio de decisão referente a qualidade da cerveja Pilsen, utilizando lógica Fuzzy, foi desenvolvido no Software livre Scilab® por meio do *toolbox Fuzzy* considerando as variações nas distintas faixas de especificações de 5 parâmetros físico-químicos descritos na **Tabela 3**, como descrito no item 5.1.1.

As Figuras das Funções de Pertinência para cada um dos parâmetros físico-químicos estudados foi o mesmo quando se utilizou o Software INFUZZY e deste modo não serão apresentados novamente nesta etapa.

Na sequência entre as **Figura 20** à **Figura 26**, são ilustradas as superfícies de respostas obtidas levando em consideração as variáveis estudadas: CO₂, Densidade, pH, Cor e Teor Alcoólico. Como se observou que os parâmetros CO₂ e teor alcoólico apresentaram uma influência maior em relação as demais variáveis, decidiu-se ilustrar as respostas obtidas em função destas duas principais.

Por meio da **Figura 20** pode-se observar que para a cerveja ser considerada aprovada, somente quando os valores de ambas as variáveis de interesse estiverem dentro dos padrões exigidos. Quando alguma destas variáveis apresentar valores não ideais, a cerveja será considerada aprovada com alteração (valores de CO₂ acima de 0.6) ou mesmo reprovada (valores de densidade menores de 1.015).

A **Figura 21** ilustra os resultados quando se utilizou como variáveis de entrada o CO₂ e pH e pode-se observar que, como era esperado pelas regras Fuzzy, que uma cerveja só seria considerada aprovada quando todos os valores de entrada estivessem dentro dos padrões estabelecidos (valores de CO₂ entre 0.5 e 0.6 e valores de pH em torno de 4,0 a 4,5).

Figura 20. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas $\text{CO}_2 \times$ Densidade.

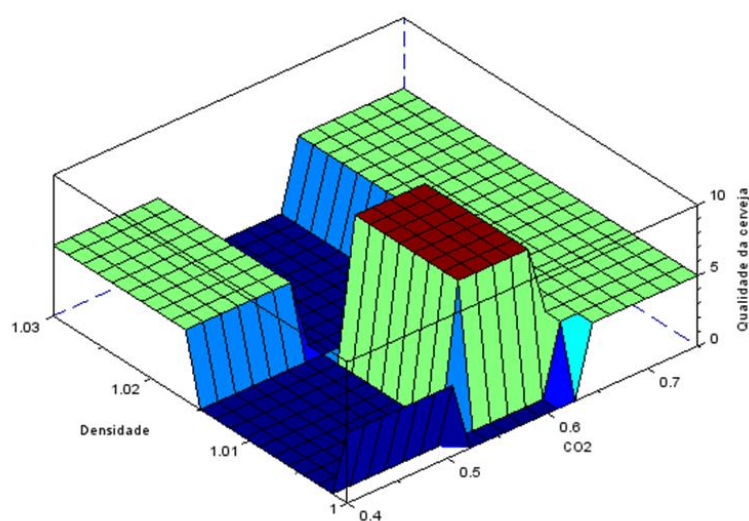
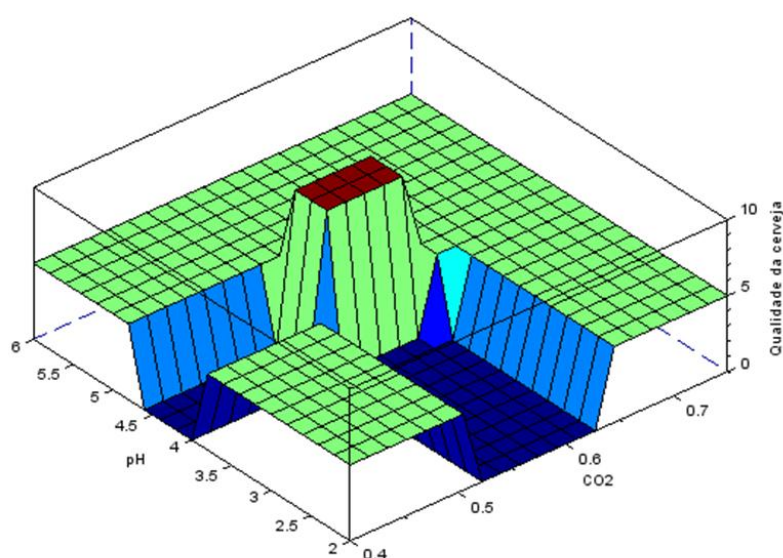


Figura 21. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas $\text{CO}_2 \times$ pH.



A **Figura 22** ilustra os resultados obtidos por meio da superfície de resposta levando em consideração agora as variáveis linguísticas CO_2 e Cor. Pode-se observar que a qualidade da cerveja será reprovada se valores da Cor estiverem na faixa entre 2,5 e 5,5 e valores de CO_2 menores que 0,5. Por outro lado, a cerveja está dentro das normas para consumo quando os valores das variáveis em estudo estiverem dentro dos padrões estabelecidos. Os mesmos resultados podem ser observados na **Figura 23**, quando se avaliou o Teor alcoólico e o CO_2 .

Figura 22. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas $\text{CO}_2 \times \text{Cor}$.

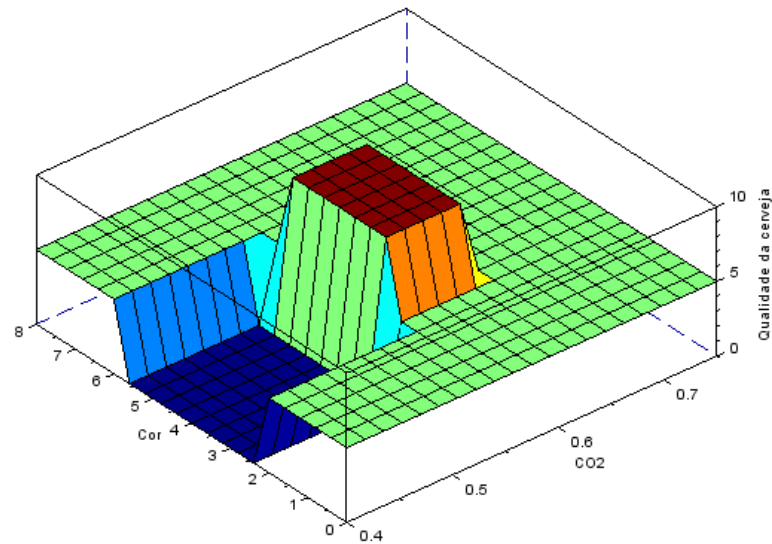
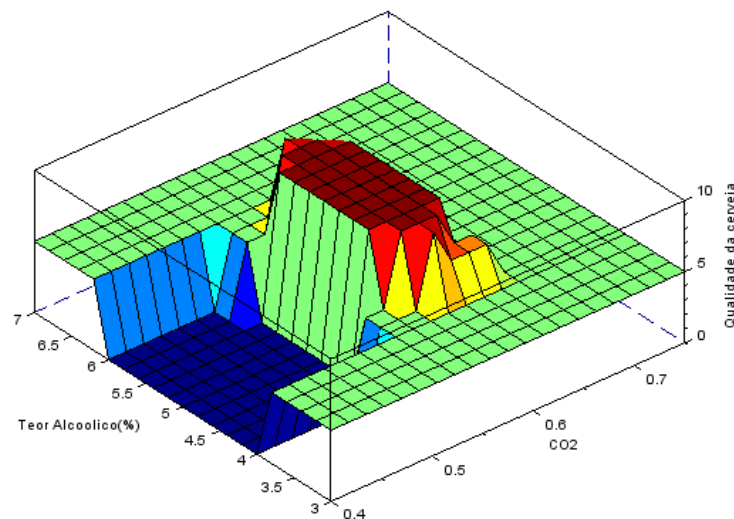
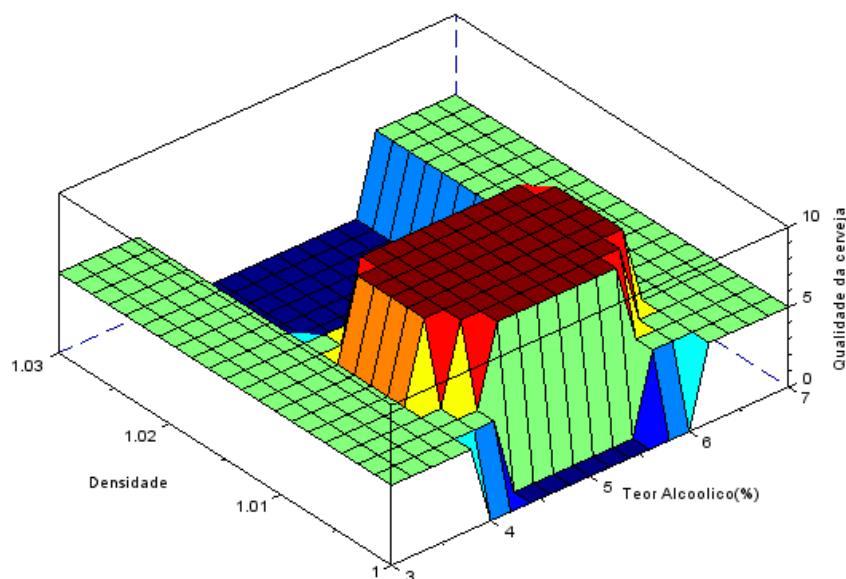


Figura 23. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas $\text{CO}_2 \times \text{Teor Alcoólico}$.



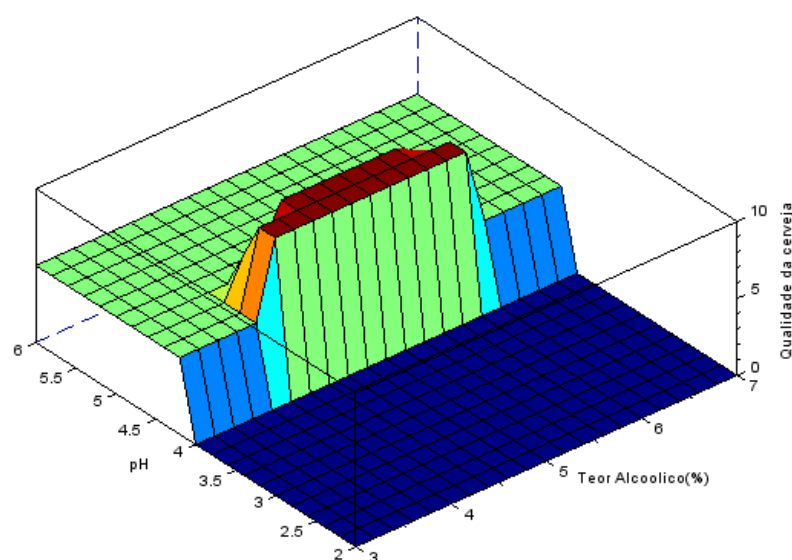
Entretanto, analisando a **Figura 24** que ilustra os resultados para as variáveis Densidade e Teor Alcoólico, pode se observar que a qualidade da cerveja será considerada aprovada (grau de pertinência de defuzzificação de 10) quando os valores de densidade estiverem dentro do intervalo de 1.010 e 1.020 e o valor do Teor Alcoólico estiver dentro do ideal, ou seja, entre 4 e 6%. Se o Teor Alcoólico estiver fora desta faixa destacada, a cerveja será considerada aprovada com alteração, com um grau de pertinência de 5,0.

Figura 24. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas Teor Alcoólico \times Densidade.



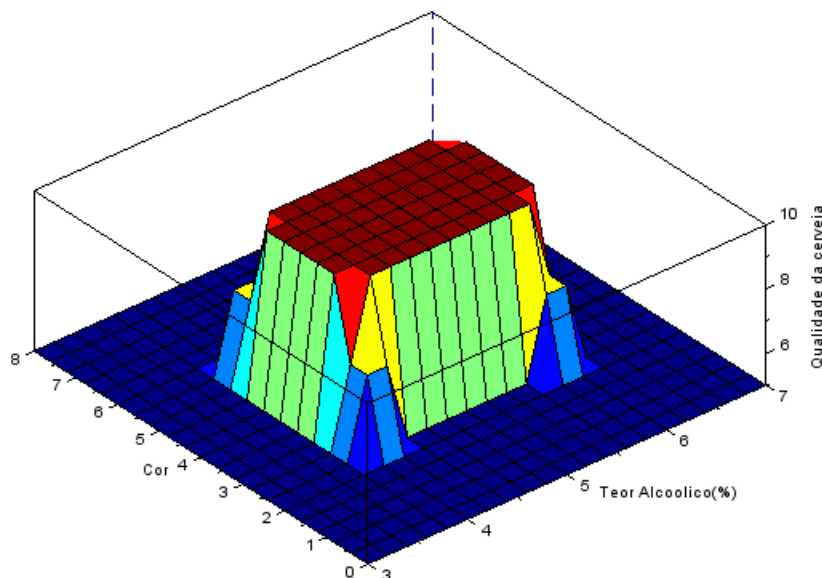
Já em relação a variável pH (*Figura 25*), pode-se observar que para valores de pH menores que 4 a qualidade da cerveja já é considerada reprovada, sendo aprovada para consumo somente quando os valores de pH estiverem em torno de 4,2 a 4,5 e o teor alcoólico entre 4,0 e 5,5%.

Figura 25. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas Teor Alcoólico \times pH.



Entretanto, quando se analisou as variáveis de entrada Teor Alcoólico e Cor (**Figura 26**) a cerveja estará aprovada somente quando os valores destas estiverem dentro da idealidade, caso contrário, a resposta será considerada reprovada.

Figura 26. Superfície de resposta com as variáveis linguísticas Teor Alcoólico \times Cor.



Estes resultados utilizando o Software Scilab® serviram de um complemento se comparado com o Software INFUZY, uma vez que ao invés de somente observar um dado pontual numérico para a resposta qualidade, pode-se observar os resultados dentro de uma região delimitada pelos intervalos de cada uma das variáveis.

5.2. PROGRAMAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO TIPO DE CERVEJA

Para avaliação do tipo de cerveja em questão foram consideradas as variáveis seguintes:

- IBU;
- Teor Alcoólico;
- Cor;
- Densidade Final.

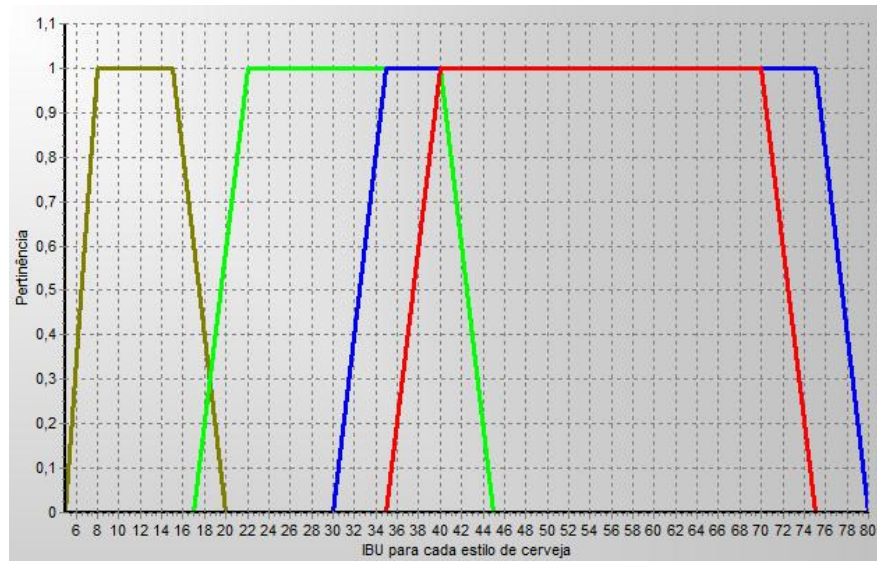
Tais parâmetros foram considerados baseando nas características ponderadas pelo *Bear Judge Certification Program* (BJCP). Relembrando que o programa foi destinado para classificar apenas as cervejas dos tipos:

- Pilsen Alemã;
- American IPA;
- Stout Americana;
- Cerveja de trigo Alemã.

Continuando a linha de raciocínio utilizada na programação do item anterior, foram feitas as representações gráficas para cada uma das funções pertinência de cada uma das variáveis linguísticas consideradas.

Nota-se que uma variável em estudo nova foi inserida comparado a programação para determinação da qualidade das cervejas. O IBU (Figura 27) quantifica o quanto a cerveja é amarga, variando em uma escala de 0 a 100, conferindo o amargor proporcionado pelos lúpulos da cerveja. Esse amargor é quantificado a partir dos alfa-ácidos presentes na planta. O lúpulo contém em suas pétalas óleos essenciais, ou resinas. Aonde se encontram os alfa-ácidos que, no processo de fabricação da cerveja, são responsáveis por proporcionar o amargor a bebida. Com isso tem-se que, as cervejas Stout Americana e American IPA são mais amargas, logo um IBU elevado e a Pilsen Alemã e a Cerveja de trigo Alemã por serem cervejas mais leves possuem um IBU baixo.

Figura 27. Representação gráfica da variável linguística IBU e suas funções de pertinência. (-) Cerveja de trigo Alemã; (-) Pilsen alemã; (-) Stout Americana; (-) American IPA (Próprio Autor).



Progredindo no processo da obtenção do programa para classificação do tipo de cerveja, a seguir são apresentadas, pelas Figuras 28 a 30, as representações gráficas de cada uma das variáveis linguísticas em estudo.

Figura 28. Representação gráfica da variável linguística Teor Alcoólico e suas funções de pertinência. (-) Cerveja de trigo Alemã; (-) Pilsen alemã; (-) Stout Americana; (-) American IPA (Próprio Autor).

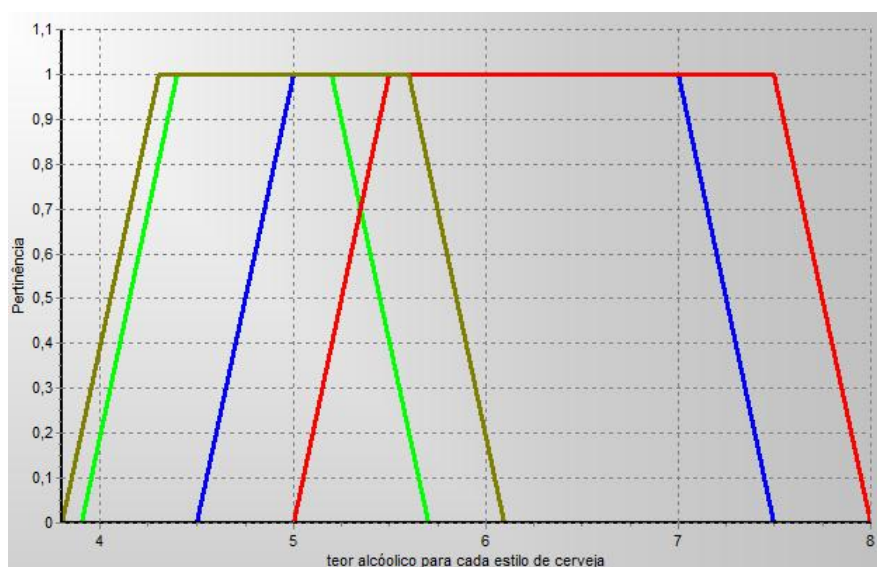


Figura 29. Representação gráfica da variável linguística Cor e suas funções de pertinência. (-) Cerveja de trigo Alemã; (-) Pilsen alemã; (-) Stout Americana; (-) American IPA (Próprio Autor).

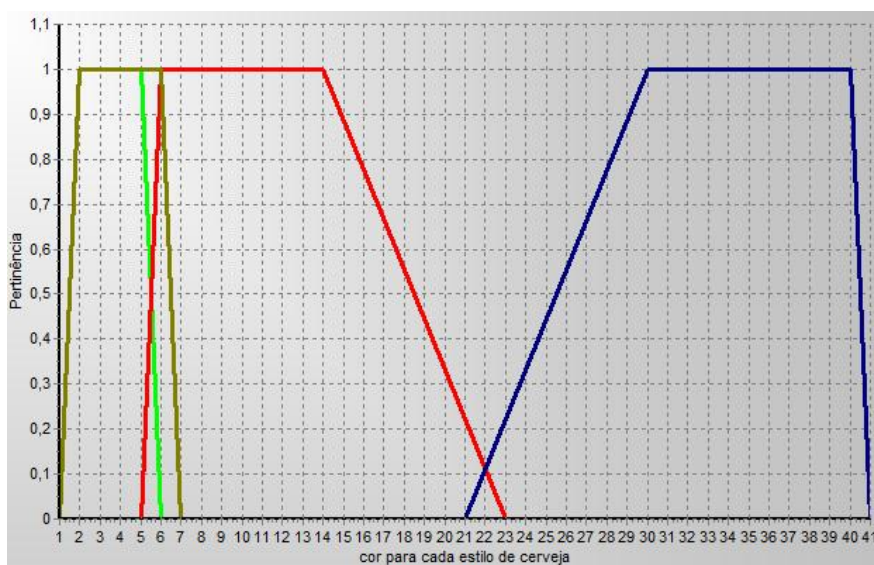
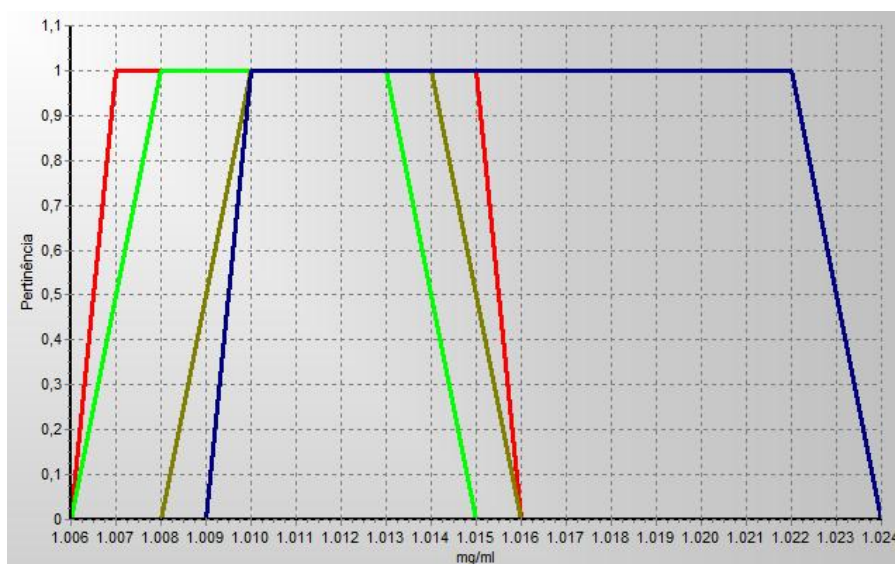


Figura 30. Representação gráfica da variável linguística Densidade Final e suas funções de pertinência. (-) Cerveja de trigo Alemã; (-) Pilsen alemã; (-) Stout Americana; (-) American IPA (Próprio Autor).



Acompanhando o fluxograma da **Figura 13**, foi criada também uma base de regras, em que por meio do estudo da lógica Fuzzy têm-se como resposta qual o tipo de cerveja em questão está sendo analisado. O banco de regras está apresentado na **Tabela 11**, totalizando um somatório de 4 regras no geral necessárias para determinação do tipo de cerveja.

Tabela 11. Base de regras proposta para avaliação do tipo de cerveja (Próprio Autor).

VARIÁVEIS				SAÍDA
IBU	COR	DENSIDADE	TEOR ALCOÓLICO	TIPO DE CERVEJA
AMERICAN IPA	AMERICAN IPA	AMERICAN IPA	AMERICAN IPA	AMERICAN IPA
PILSEN ALEMÃ	PILSEN ALEMÃ	PILSEN ALEMÃ	PILSEN ALEMÃ	PILSEN ALEMÃ
STOUT ALEMÃ	STOUT ALEMÃ	STOUT ALEMÃ	STOUT ALEMÃ	STOUT ALEMÃ
CERVEJA DE TRIGO ALEMÃ	CERVEJA DE TRIGO ALEMÃ	CERVEJA DE TRIGO ALEMÃ	CERVEJA DE TRIGO ALEMÃ	CERVEJA DE TRIGO ALEMÃ

Reafirmando assim que as regras foram formadas pelos seguintes conectivos, exemplo; **SE** IBU= American IPA **E** Cor= American IPA **E** Densidade Final= American IPA **E** Teor Alcoólico= American IPA **ENTÃO** Tipo de Cerveja= American IPA.

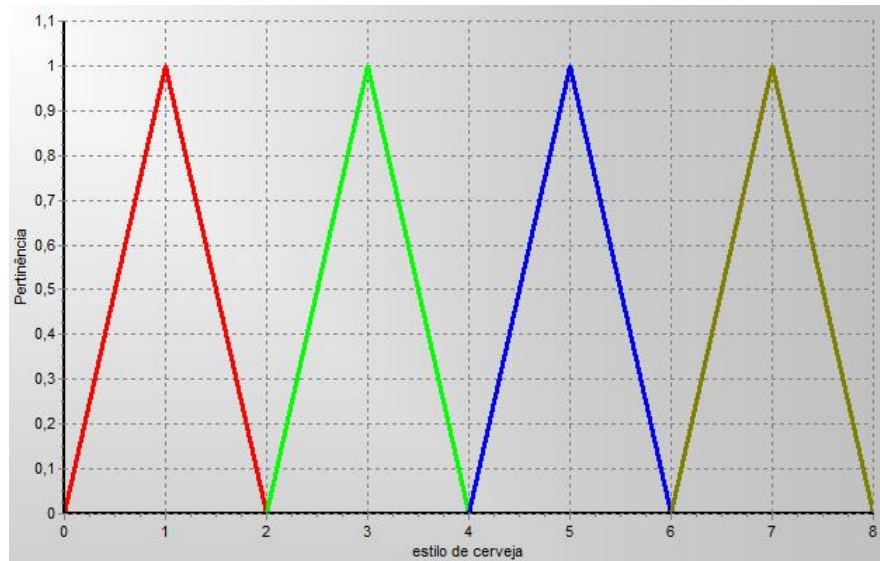
Por meio das características e os faixas de cada estilo de bebida mencionados anteriormente, pode-se identificar cada tipo de cerveja através da resposta numérica que o programa fornece a cada simulação. Obedecendo o seguinte padrão a seguir:

- Pilsen Alemã → resultado = 3;
- American IPA → resultado = 1;
- Stout Americana → resultado = 5;
- Cerveja de trigo Alemã → resultado = 7.

Com a confecção do segundo sistema de apoio de decisão concluída, foram realizadas simulações em que se atribuiu diferentes valores para todas as variáveis manipuladas e obtendo como resposta os valores representados na **Tabela 12**.

Em contrapartida da programação sobre a qualidade das cervejas, as simulações feitas para avaliação do tipo de cerveja em estudo, todos os métodos de defuzzificação foram aceitáveis para a realização da análise, pois obteve-se uma igualdade dentre os resultados encontrados para variável saída. Isso ocorre, pelo fato das funções que representam a variável saída → tipos de cervejas (**Figura 31**) estar mais separadas e não existir a sobreposição de áreas dentre seus termos linguísticos.

Figura 31. Representação gráfica da variável linguística Tipos de Cervejas e suas funções de pertinência. (-) Cerveja de trigo Alemã; (-) Pilsen alemã; (-) Stout Americana; (-) American IPA (Próprio Autor).



Assim, na programação anterior da qualidade das cervejas sobre os métodos de defuzzificação, o método centro de gravidade contorna o fato da possível negligência da sobreposição das áreas para variável saída em estudo, assim se correlacionando com os métodos média dos máximos e centro dos máximos que se aproximam entre si no processo de defuzzificação.

Tabela 12. Simulação com diferentes valores de IBU, teor alcoólico, cor e densidade final e também diferentes métodos de defuzzificação para o resultado final que é o tipo da cerveja, sendo 1 o estilo American IPA, 3 o estilo Pilsen Alemã, 5 a cerveja Stout Americana e 7 a Cerveja de Trigo Alemã.

VARIÁVEIS				SAÍDA → TIPO DE CERVEJA		
IBU	COR	DENSIDADE FINAL	TEOR ALCOÓLICO	CENTRO DE GRAVIDADE	CENTRO DOS MÁXIMOS	MÉDIA DOS MÁXIMOS
10	4	1013	5	7	7	7
50	12	1013	5,5	1	1	1
47	40	1011	5	5	5	5
22	5	1009	5	3	3	3
23	5	1009	4,8	3	3	3
60	39	1010	4,7	5	5	5
12	5	1012	4,6	7	7	7
70	8	1015	7,3	1	1	1

6. CONCLUSÕES

É notável que o processo de produção de cervejas é consideravelmente complexo e que recebe continuamente modificações ao longo dos anos de acordo com a demanda do mercado e inovações tecnológicas que vão surgindo. Um grande conhecimento de todos os detalhes do processo e um controle exato das variáveis do processo é exigido para que o produto alcance a qualidade final desejada.

Dessa forma, foram estudadas as variáveis mais influentes na qualidade do produto (cerveja), observando que para cada uma delas foi necessário atenção para qual tipo de função pertinência inserir para elaboração de ambos os programas (qualidade da cerveja Pilsen e classificação dos tipos de cervejas). Com os resultados, pode-se reduzir o banco de regras do primeiro programa para apenas 9 Regras Fuzzy ao invés de 162 regras Fuzzy, caso fosse feita todas as combinações, sem perda de informação.

Os resultados das simulações do primeiro sistema de apoio de decisão, utilizando a lógica Fuzzy, evidenciaram que dentre os métodos de defuzzificação, o método Centro de Gravidade se diferenciou dos demais pelo fato dele não ser indicado para sistemas complexos (no caso um sistema de cinco variáveis apresenta um alto grau de complexidade) e pelo formato das funções pertinências (intersecção entre elas), o que sugere uma sobreposição das áreas durante a realização dos cálculos. Entretanto, a melhor escolha referente ao critério de defuzzificação (Centro de gravidade, médias dos máximos e centro dos máximos) deverá ser feito pelo especialista/usuário, levando em consideração ao processo a ser aplicado.

Identificou-se na execução das simulações, o modelo de variar apenas uma variável e manter as demais em valores ideais possibilitou perceber que a variável pH se destaca no processo de produção de cerveja por contribuir diretamente para os valores das variáveis densidade e teor alcoólico e a variável CO₂ em relação a sua influência direta com a segurança de armazenagem do produto, além da variável teor alcoólico que precisa seguir as normas vigentes para aprovação do produto.

Todas essas ponderações mencionadas são aplicadas em ambos os softwares (INFUZZY E Scilab®). Além disso, com o software Scilab® foi possível se ter uma visão pelas superfícies de respostas das regiões da variável saída *qualidade da cerveja*, onde apresentou suas possíveis variações linguísticas com a possibilidade de se variar duas variáveis linguísticas em valores fora da idealidade. Dentre as combinações feita entre as variáveis de forma aleatória, pode-se observar uma menor região de produto aprovado para o consumo, isso se justifica pelo fato da importância das variáveis simuladas em questão (pH e

CO₂) para o processo de produção de cerveja, sendo aprovada para consumo somente quando ambas estavam dentro da idealidade, ou seja, pH na faixa entre 4,0 e 4,5 e CO₂ entre 0,52 e 0,62 %. O mesmo levantamento pode ser observado quando se faz a análise da variável Teor alcoólico, que a cerveja somente será aprovada pelo apoio de decisão se a variável estiver dentro da faixa de 4 a 6 %.

Quanto ao segundo programa, referente à classificação dos tipos de cerveja, os resultados obtidos na simulação foram válidos para os valores simulados e pode-se observar que o sistema classificou todas as cervejas de maneira correta, independentemente do método de defuzzificação. Vale ressaltar que quando se criou as funções de pertinência de saída para a classificação de cervejas, nota-se que as funções não possuem intersecção entre si, o que contorna o fato da sobreposição das áreas durante os cálculos para o método em questão, por isso uma igualdade dentre os métodos foi obtida. Deste modo, pode-se afirmar que o segundo sistema Fuzzy previu corretamente, em mais de 99% das vezes, o teor alcoólico, cor e a densidade da cerveja produzida, indicando ao usuário o tipo de cerveja escolhido.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AQUARONE, E.; BORZANI W.; SCHMIDELL W.; LIMA; A. U. *Biotecnologia Industrial*. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. P.91-143.
- BEER JUDGE CERTIFICATION PROGRAM. Beer Style Guidelines. 2015 Edition. Disponível em: < <https://www.bjcp.org/stylecenter.php> > Acesso em: 25/06/2021.
- BILOBROVEC, M., MARCAL, R. F. M. AND KOVALESKI, J. L. Implementação de um Sistema de Controle Inteligente Utilizando a Lógica Fuzzy. *XI SIMPEP*, Bauru, SP, 2004.
- BONACCORSI, M. M. Guia de Estilos- BJCP. 2016.
- BORGES, P. F. O. Concentração do mercado de cerveja no brasil e a participação das micro cervejarias. Monografia (Graduação) Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense, 2015.
- BORTOLI, D. A. S.; et al. Leveduras e produção de cervejas: revisão. *Bioenergia em Revista - Diálogos*, Piracicaba, v. 1, n. 1, p. 45-58, 2013.
- BRASIL, Casa Civil, and Subchefia para Assuntos Jurídicos, Decreto Nº 6.871, de 4 de junho de 2009, Poder executivo, Editor. 2009, Diário Oficial da União.
- BREDA, M. H. Fervura e lupagem. 2010. Disponível em: <http://brejadobreda.blogspot.com/2010/01/passo-4-fervura-e-lupulagem.html>. Acesso em: 10/09/2021.
- BRIGGS. D. E., et al. *R. Brewing – Science and Practice*, Cambridge: CRC Press, 2014.
- BRUNELLI, L. T. Produção de cerveja com mel: características físico-químicas, energéticas e sensorial. 2012. 103f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Ciências Agronômicas da UNESP, Campus de Botucatu, Botucatu, 2012.
- CAMPOS FILHO, Pio. Método para apoio à decisão na verificação da sustentabilidade de uma unidade de conservação, usando lógica Fuzzy. *Tese de Doutorado* - Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- CARVALHO, G.; REDETEC, L. Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro. Produção de Cerveja. Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, Rio de Janeiro, 2007.
- DINSLAKEN, D. 8 dicas para melhorar a clarificação da cerveja. 2016. Disponível em: <https://concerveja.com.br/8-dicas-para-melhorar-clarificacao-da-cerveja/>. Acesso em: 10/07/2021.
- DINSLAKEN, D. Manual do Cervejeiro Caseiro. 2016. Disponível em:< http://concerveja.com.br/cervejaequilibrada/?utm_campaign=blogbase_31_bugu&utm_medium=email&utm_source=RD+Stat+ion>. Acesso em: 28/06/2021.
- DRAGONE, G.; SILVA, J. B A. Cerveja. In VENTURINI FILHO, W. G. *Bebidas alcoólicas: Ciência e tecnologia*. v. 1, São Paulo: Blucher, 2010. p. 31-33.
- FERNANDES, F. A. P. Melhoria dos indicadores microbiológicos em linhas de enchimento de cerveja em barril. Dissertação Mestre em Tecnologia e Segurança Alimentar, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- GARBIN, R. F. Turismo cervejeiro: a cerveja artesanal brasileira, 2017.

- GAVA, A. J; SILVA, C. A. B; FRIAS, J. R. G. Tecnologia de Alimentos: Princípios e Aplicações. São Paulo: Nobel, 2008. 511 p.
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. MODELAGEM. CONTROLE, SISTEMAS E LÓGICA FUZZY. SBA Controle & Automação, v. 4, n. 3, p. 19, 1994.
- HOFFMAN, L. A; QUADRELLI, G; PIZZOLATO, N.D; ARAUJO, F.O. Proposta de sistema baseado em lógica Fuzzy como modelo de apoio a decisão para a qualidade do produto acabado em uma microcervejaria brasileira. *Espacios*, v. 38, p.31, 2016.
- JORGE, E. P. M. Processamento de cerveja sem álcool. *Trabalho de Graduação*, Pontifícia Universidade Católica, Goiânia, 2004.
- JUAN. Nossa cerveja – 7ª Pilsen/Pale Ale. 2013. Disponível em: . Acesso em: 05 jun. 2021.
- KALNIN, J. L.; CASAROTTO FILHO, N.; CASTRO, J. E. E. Análise estratégica para implantação de empresas de pequeno porte: cervejarias artesanais. *Revista Produção On Line*, v. 2, n. 1, 2002.
- KUCK, L. S. Cerveja: Sabor e Aroma. 2008. 47f. Trabalho acadêmico (Bacharelado em Química de Alimentos) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS. Pelotas, 2008.
- KUNZE, W. Technology: Brewing & Malting. 4. ed. Alemanha: VLB Berlin, 2010.
- LIMA, L. L. A.; FILHO, A. B. M. Técnico em alimentos: tecnologia de bebidas. 2011.
- LIMBERGER, S. C. O setor cervejeiro no Brasil: Gênese e evolução. *Revista Cadernau*. Rio Grande, 2013.
- MARTINS, F. S. et. Al. Estudo do potencial probiótico de linhagens de *saccharomyces cerevisiae* através de testes in vitro. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*. Vol 5; Nº 2; Ano 2014.
- MATOS, R. A. G. Cerveja: panorama do mercado, produção artesanal, e avaliação de aceitação e preferência. 2011. 90f. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- MEGA, J. F.; NEVES, E.; ANDRADE, C. J. A produção de cerveja no Brasil. *Citino*, v. 1, n. 1, p. 34-42, 2011.
- MONTEIRO, R. A. S; ARAUJO, F. F. Produção de Sentidos na Indústria Cultural da Cerveja: Aspectos do processo discursivo nas ações de marketing de experiências, *Rio de Janeiro*, v.4, no.2, p.128-145, 2020.
- NELLES, O. Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and Fuzzy models. [s.l: s.n.].
- NETO, J. C. B. ., CRISTINA ARAÚJO PARREIRA, C., SALES, J. V. C. S., RIBEIRO, B. P. ., LAIZO, W. S. ., MONTEIRO, F. C. ., DE FREITAS, J. A. Aplicação da Lógica Fuzzy para previsão de parâmetros em um reator nuclear. *Conjecturas*, 22(2), 778–786, 2022. <https://doi.org/10.53660/CONJ-734-B05>.
- NIKOLOPOULOS, C. Expert systems: New York: Marcel Dekker, Inc., 1997.
- NASCIMENTO, L. Aproveitamento da torta residual da extração do óleo da polpa de macaúba (*Acrocomia aculeata*) como adjunto de malte na produção de cerveja. Orientador: Edson Romano Nucci. 2018. Dissertação de Mestrado - Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São João Del-Rei. Ouro Branco.

- NUCCI, E. R. et al. A Fuzzy logic algorithm for identification of the harvesting threshold during PGA production by *Bacillus megaterium*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 22, n. 4, p. 521–527, dez. 2005.
- NUCCI, E. R. Inteligência Computacional aplicado no Processo de produção de Penicilina G Acilase. Tese de Doutorado—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2007.
- OETTERER, M.; ALCARDE, A. R. Tecnologia da fabricação de cerveja. In: OETTERER, M.; D'ARCE, M. A. B. R.; SPOLO, M. H. F. *Fundamentos de Ciência E Tecnologia de Alimentos*. Barueri (Sp): Editora Manole Ltda, p.612, 2006.
- PALMER, J. *How to brew- everything you need to know to brew beer right the*. Brewers Publications, 3rd edition, 2006.
- POSSELT, E. L.; FROZZA, R.; MOLZ, R. F.. *Software InFuzzy 2011*. Programa de Mestrado em Sistemas e Processos Industriais PPGSPI, UNISC, 2011.
- PRADO, P. H. S.; FREGOLANTE, L. V.; AFONSO, A.P. Avaliação de risco: uma abordagem baseada na teoria dos conjuntos Fuzzy. *9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás*, Maceió, AL, 2017.
- RABUSKE, R. *Inteligência Artificial*. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.
- REITENBACH, A. F. Desenvolvimento de cerveja funcional com adição de probiótico: *Saccharomyces boulardii*. 2010. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- REZENDE, Solange Oliveira. *Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações*. Barueri, SP: Manole, 2005. 525 p.
- RIBEIRO, B. D et al. *Microbiologia Industrial: Alimentos*. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, p.496, 2018.
- RIGNEL, D. G. S; CHENCI, G. P; LUCAS, C. A. Uma introdução a lógica Fuzzy. *Revista eletrônica de sistema de informação e gestão tecnológica*. 2011.
- ROSA, N.A; AFONSO, J.C. A Química da Cerveja. *Química e Sociedade*, São Paulo, v.37, p. 98-105, 2015.
- SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. *Participação das Micro e Pequenas Empresas na Economia Brasileira*. Brasília/DF. Grupo Informe Comunicação Integrada. 2014.
- SEBRAE. *Cartilha do Empreendedor Legalização de Micro e Pequenas Cervejarias*. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://sindanf.com/wpcontent/uploads/2017/10/CartilhaCervejariasdigital.pdf>. Acessado em 01/12/2021.
- SELLITO, Miguel Afonso – *Inteligência Artificial: Uma Aplicação em uma Indústria de Processo Contínuo*. *Gestão e Produção*, v.9, no.3, p.363-376, 2002.
- SILVA, C. R. A.; ANDRADE, C. M. G.; SOUZA, A. C.; PANUCI, V. C.; CONCEIÇÃO, W. A. S. COUTINHO, M. R. Controle de nível em tanque através da mescla entre Scilab® e Arduino baseado no controle PI. In: *III Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos*. Curitiba, 2018. p. 92-99.
- SILVA, D. Moagem de malte. 2017. Disponível em: <https://www.condadodacerveja.com.br/moagem-do-malte/>. Acesso em: 06/07/2021.

- SOUSA JÚNIOR, R. Aplicação da lógica nebulosa no controle de reatores bioquímicos para a produção de Cefalosporina C em regime de batelada alimentada. Dissertação de mestrado—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1999.
- SOUSA, R.; ALMEIDA, P. I. F. Design of a Fuzzy system for the control of a biochemical reactor in fed-batch culture. *Process Biochemistry*, v. 37, n. 5, p. 461–469, dez. 2001.
- STEFENON, R. Vantagens Competitivas Sustentáveis na Indústria Cervejeira: O caso das cervejas especiais. *Revista Capital Científico - Eletrônica (Rcce)*, 2012.
- VENTURINI FILHO, WG; CEREDA, MP. Cerveja. In: Almeida lima,U., Aquarone, E., Borzani, W., Schmidell, W. *Biotecnologia Industrial (Biotecnologia na produção de alimentos)*. São Paulo: Edgar Blucher, v.1. p. 91-144, 2001.
- ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. *Information and control*, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.
- ZUPPARDO, B. Uso da goma oegonum para estabilização coloidal e de espuma em cerveja. Dissertação Mestre em ciências. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.