INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

LUCAS MANTUAN AYRES

UM SISTEMA ESPECIALISTA BASEADO EM LÓGICA DIFUSA PARA DETECÇÃO DE RISCOS POTENCIAIS NA FORMAÇÃO DO ELETRODO SØDERBERG

Serra
2023

LUCAS MANTUAN AYRES

UM SISTEMA ESPECIALISTA BASEADO EM LÓGICA DIFUSA PARA DETECÇÃO DE RISCOS POTENCIAIS NA FORMAÇÃO DO ELETRODO SØDERBERG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio de Souza Leite Cuadros.

Coorientadores: Prof. Dr. Gustavo Maia de Almeida e Prof. Dr. Flavio Barcelos Braz da Silva

Serra

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A985s 2023

Ayres, Lucas Mantuan
Um sistema especialista baseado em lógica difusa para detecção de riscos potenciais na formação do eletrodo Søderberg / Lucas Mantuan Ayres. - 2023.
95 f.; il.; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio de Souza Leite Cuadros.
Coorientadores: Prof. Dr. Gustavo Maia de Almeida ; Prof. Dr. Flavio Barcelos Braz da Silva.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Espírito Santo, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Controle e Automação, 2023.

1. Automação. 2. Eletrodo Soderberg. 3. Forno elétrico submerso. 4. Lógica Fuzzy. 5. Metalurgia. I. Cuadros, Marco Antonio de Souza Leite. II. Instituto Federal do Espírito Santo. III. Título.

CDD 629.895

Bibliotecário: Valmir Oliveira de Aguiar - CRB6/ES 566

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

LUCAS MANTUAN AYRES

"UM SISTEMA ESPECIALISTA BASEADO EM LÓGICA DIFUSA PARA DETECÇÃO DE RISCOS POTENCIAIS NA FORMAÇÃO DO ELETRODO SØDERBERG"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em 13 de novembro de 2023

COMISSÃO EXAMINADORA

MARCO ANTONIO DE SOUZA LEITE CUADROS:52738361234

Assinado de forma digital por MARCO ANTONIO DE SOUZA LEITE CUADROS:52738361234
Dados: 2023.11.27 14:01:19 -03'00'

Prof. Dr. Marco Antonio de Souza Leite Cuadros
Professor Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br GUSTAVO MAIA DE ALMEIDA
Data: 24/11/2023 19:32:42-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Gustavo Maia de Almeida
Professor Coorientador

Documento assinado digitalmente
gov.br FLAVIO BARCELOS BRAZ DA SILVA
Data: 24/11/2023 18:52:49-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Flavio Barcelos Braz da Silva
Professor Coorientador

Documento assinado digitalmente
gov.br GABRIEL TOZATTO ZAGO
Data: 27/11/2023 13:10:47-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Gabriel Tozatto Zago
Examinadora da Banca Interna

Breno Totti Maia

Prof. Dr. Breno Totti Maia
Examinador da Banca Externa

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter chegado a este ponto e por me abençoar com saúde, perseverança, boas amizades e o amparo da minha família.

Agradeço aos meus pais e irmão por acreditarem e confiarem nas minhas escolhas, em especial à minha mãe (Simone), que sempre foi meu suporte e conselheira em todos os momentos.

Agradeço imensamente à parceria dos amigos do GAIn (Leo, Pablo, Joabe, Ramon, João, Igor, Jaque, Taice, Carlos e Caio). Foram inúmeros os momentos de estudo, dedicação, risos e companheirismo ao lado de todos vocês.

Sou grato à Gaintech Tecnologia, a empresa que me acolheu, e me sinto extremamente feliz por ter a oportunidade de trabalhar com meus melhores amigos na criação de soluções incríveis para a indústria.

Agradeço sinceramente pela amizade e apoio dos professores do GAIn (Gustavo, Rogério e Marco), sendo Marco, um grande líder que sempre nos guiou com humildade e respeito, buscando a união do grupo.

Aos meus orientadores e coorientadores (Marco Cuadros, Gustavo Maia e Flavio Barcelos) pela contribuição acadêmica, paciência e direcionamento no desenvolvimento deste trabalho.

Expresso minha gratidão à VAMTEC, em particular a Amaro, Euclydes e Lana, por acreditarem no projeto, compartilharem o conhecimento necessário e contribuírem diretamente para o sucesso deste trabalho. Meus agradecimentos se estendem a todos os outros membros da empresa que apoiaram na execução desse projeto.

Ao IFES – Campus Serra, meu profundo reconhecimento por ter proporcionado um ambiente que contribuiu significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

E a todos os demais que de alguma forma contribuíram para a minha formação no ProPECAut, sou eternamente grato."

“Minha energia é o desafio, minha motivação é o impossível, e é por isso que eu preciso ser, à força e a esmo, inabalável”

Augusto Branco

RESUMO

O processo de formação de ferroligas em fornos a arco submerso se dá através da conversão massiva de energia elétrica em energia térmica no interior dos fornos, por intermédio de eletrodos do tipo Søderberg. O eletrodo é formado durante o processo do forno, e sua matéria prima é chamada de pasta eletródica, que assume formatos de bloco, briquete ou cilíndrico. Quando a pasta é introduzida no processo, ela está sujeita a condições que criam assimetrias de nível que podem afetar a formação do eletrodo e causar sua quebra. Outro evento indesejado é a segregação, que separa as fases da pasta, deixando os eletrodos mecanicamente fracos e diminuindo sua eficiência. Há também o evento denominado engaiolamento que forma bolsões de ar na pasta e acarreta eletrodos malformados e pode ocasionar a parada do fluxo de pasta da coluna do eletrodo. Devido as condições de baixa iluminação do ambiente operacional e a restrição visual da pasta após sua inserção no processo, esses distúrbios são difíceis de serem identificados pelos operadores, e quando são, ocorrem somente por auxílio de recurso humano, não havendo um sistema de monitoramento contínuo para identificar e gerar alertas de ocorrência. Neste cenário, o emprego de sistemas especialistas (SEs) apresenta-se como uma alternativa para agregar e estruturar o conhecimento operacional para inferir, de forma assertiva e automática, sobre a ocorrência desses distúrbios. Este trabalho apresenta uma abordagem de um sistema especialista difuso para a inferência dos três riscos potenciais na formação do eletrodo Søderberg. Ao longo do trabalho será destacado o desenvolvimento do protótipo projetado e construído para aquisitar dados do processo que foram tratados e posteriormente introduzidos no SE implementado para validar as inferências. Soma-se a este destaque, a estrutura do sistema especialista, assim como os resultados estimados pelo SE para detectar o grau de simetria, segregação e engaiolamento de pasta, que serão expostos graficamente considerando dados reais de nível e temperatura de pasta eletródica.

Palavras-chave: eletrodo Søderberg. Forno a arco submerso. Lógica *fuzzy*. Sistemas especialistas.

ABSTRACT

The process of forming ferroalloys in submerged arc furnaces is accomplished by the massive conversion of electrical energy into thermal energy within the furnaces by Søderberg-type electrodes. The electrode is formed during the furnace process and its raw material is called electrode paste, which takes block, briquette or cylinder formats. When the paste is introduced into the process, it is subject to conditions that cause level asymmetries, which can affect the formation of the electrode and lead to its breakage. Another undesirable event is segregation, which separates the paste phases, making the electrodes mechanically weak and decreasing their efficiency. Another event is formation of bridges, in which air bubbles form in the paste and lead to malformed electrodes and can stop flow of paste in the electrode column. Due to the poor lighting conditions in the operating environment and the visual degradation of the paste after it is introduced into the process, these faults are difficult for operators to detect, and when they do occur, they have only human resources and no continuous monitoring system to identify them and generate alerts. In this scenario, the use of expert systems (SEs) is an alternative to summarize and structure the operational knowledge in order to automatically infer the occurrence of these faults. In this work, a *fuzzy* expert system approach is presented for inferring the three potential hazards in the formation of the Søderberg electrode. Throughout the work, the development of the prototype is highlighted, which was designed and built to collect process data that will later be implemented in the SE to validate the conclusions. Additionally, to this highlight, the structure of the expert system, as well as the results estimated by the expert system for detecting the degree of symmetry, segregation, and paste entrapment, will be graphically presented using real data regarding the level and temperature of electrode paste.

Keywords: Søderberg electrode. Submerged arc furnace. *Fuzzy* logic. Expert systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conexão Knapsack típica em um SAF trifásico. 24
Figura 2 - Principais partes constituintes de um forno a arco submerso. 25
Figura 3 - Vista superior do interior da coluna do eletrodo. 26
Figura 4 - Formatos típicos de pasta eletródica. 27
Figura 5 - Gradiente de temperatura ao longo da coluna do eletrodo. 28
Figura 6 - Ilustração simplificada das partes constituintes da coluna do eletrodo. 30
Figura 7 - Comparação ilustrativa entre nível de pasta assimétrico e uniforme. 33
Figura 8 - Diferença entre eletrodo afetado pela segregação (imagem à direita, n°2) e eletrodo operando em condições normais (imagem à esquerda, n° 6). 34
Figura 9 - Exemplo ilustrativo do efeito do engaiolamento. 36
Figura 10 - A velocidade do carro é uma variável linguística associada às funções de pertencimento dos conjuntos difusos “devagar”, “moderado” e “rápido”. 42
Figura 11 - Representação da função de pertinência para a união dos conjuntos difusos “moderado”, “rápido” e “devagar”. 46
Figura 12 - Representação da função de pertinência para a intercessão dos conjuntos difusos “moderado”, “rápido” e “devagar”.....47
Figura 13 - Arquitetura da lógica difusa.....47
Figura 14 - Vista externa da tampa inteligente. 49
Figura 15 - Ilustração da vista superior do perfil de alimentação na coluna de eletrodo de teste da tampa. 50
Figura 16 - Sensores instalados na tampa inteligente. 51
Figura 17 - Diagrama simplificado do tráfego das medidas aquisitadas. 52
Figura 18 - Disposição do *tablet* fixado à caixa de teste dos sensores e dos elementos embarcados na caixa. 53
Figura 19 - *Frames* da imagem térmica da superfície da pasta em colunas de eletrodos distintos. 55
Figura 20 - Validação da medição do sensor de nível. 56
Figura 21 - Amostra de dados de temperatura coletados pela tampa inteligente – teste secundário. 60
Figura 22 - Representação do *struct* de dados. 63
Figura 23 - Diagrama de blocos simplificado das etapas de tratamento das entradas IN-1, IN-2 e IN-4. 64
Figura 24 - Extração da distribuição de temperatura da superfície de briquetes. 66
Figura 25 - Diagrama de blocos simplificado das etapas de tratamento da entrada IN-3. 67
Figura 26 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de entrada nível de briquetes pós-tratamento. 68
Figura 27 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de entrada nível de bloco pós-tratamento. 68
Figura 28 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de entrada temperatura média da superfície de briquetes pós-tratamento. 69
Figura 29 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de entrada variação do nível de briquete da pasta pós-tratamento. 69
Figura 30 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de saída simetria de pasta. 72
Figura 31 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de saída segregação de pasta. 73

Figura 32 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de saída engaiolamento de pasta. 73
Figura 33 - Representação gráfica da distribuição de temperatura da superfície de briquetes no instante de tempo t – minicâmera 1. 76
Figura 34 - Representação gráfica da distribuição de temperatura da superfície de briquetes no instante de tempo t – minicâmera 2. 76
Figura 35 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 1. 78
Figura 36 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 2. 79
Figura 37 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 3. 79
Figura 38 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 4. 79
Figura 39 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 5. 80
Figura 40 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 6. 80
Figura 41 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 7. 80
Figura 42 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 8. 81
Figura 43 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 9. 81
Figura 44 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 10. 81
Figura 45 - Grau de segregação no instante t = 21/09/2023 13:59. 82
Figura 46 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 1. 84
Figura 47 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 2. 84
Figura 48 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 3. 84
Figura 49 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 4. 85
Figura 50 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 5. 85
Figura 51 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 6. 85
Figura 52 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 7. 86
Figura 53 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 8. 86
Figura 54 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 9. 86
Figura 55 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 10. 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição de conjunto difuso. 40
Tabela 2 - Definição de variável linguística. 41
Tabela 3 - Representação global de uma regra difusa. 42
Tabela 4 - Tipos de proposições difusas. 43
Tabela 5 - Amostra de dados de nível coletados pela tampa inteligente – teste primário. 57
Tabela 6 - Amostra de dados de nível coletados pela tampa inteligente – teste secundário. 58
Tabela 7 - Variáveis de entrada/saída e suas características. 61
Tabela 8 - Regras do sistema para detecção de riscos potenciais na formação do eletrodo Søderberg. 70
Tabela 9 - Medições de nível consultadas no instante t = 21/09/2023 13:59. 74
Tabela 10 - Medições de nível consultadas no instante t -15 = 21/09/2023 13:44. 74
Tabela 11 - Variação de nível de briquetes entre instante t e t-15. 75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 OBJETIVOS 18
1.1.1 Geral 18
1.1.2 Específicos 18
1.2 METODOLOGIA 19
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 22
2.1 FORNOS ELÉTRICOS A ARCO SUBMERSO (SAF) 22
2.1.1 Elementos constituintes do SAF 22
2.1.2 Operação do SAF 27
2.1.3 Controle de posicionamento do eletrodo 30
2.2 RISCOS POTENCIAIS PARA A FORMAÇÃO DO ELETRODO SØDERBERG 32
2.2.1 Simetria do nível da pasta eletródica 32
2.2.2 Segregação da pasta eletródica 33
2.2.3 Engaiolamento 35
2.3 LÓGICA DIFUSA 37
2.3.1 Conjuntos difusos 38
2.3.2 Variáveis linguísticas 41
2.3.3 Regras IF-THEN 42
2.3.3.1 Proposições difusas 43
2.3.4 Operadores de conjuntos difusos 43
2.3.5 Arquitetura da lógica difusa 47
3 DESENVOLVIMENTO DA TAMPA INTELIGENTE 49
3.1 ESTRUTURA DA TAMPA INTELIGENTE 49
3.2 TESTE DOS SENSORES 52
3.2.1 Minicâmera térmica 52
3.2.2 Sensor de nível 55
3.3 TESTES *IN LOCO* COM A TAMPA INTELIGENTE 56
3.4 ESTRUTURA DO SISTEMA ESPECIALISTA 61

3.4.1 Tratamento dos dados de entrada 62
3.4.2 Fuzzificação e defuzzificação 67
4 RESULTADOS 74
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 87
REFERÊNCIAS 90

1 INTRODUÇÃO

As ferroligas são utilizadas em processos metalúrgicos, destinando-se principalmente à produção de aço, pois agregam propriedades mecânicas específicas de acordo com o elemento ligado (LÚCIA *et al.*, 1999).

A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (*US EPA,* na sigla em inglês) define a ferroliga, no compilado AP-42[1], como uma liga que contém teores de ferro além de algum outro elemento diferente de carbono (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1986), sendo que os elementos químicos como Mn (Manganês), Si (Silício), Cr (Cromo), Ca (Cálcio), Al (Alumínio), Mg (Magnésio), Ti (Titânio), W (Tungstênio), V (Vanádio) e Ni (Níquel) são os mais convencionais por conferirem propriedades mecânicas distintas e desejáveis ao aço (GASIK, 2013). Por exemplo, o manganês é essencial para neutralizar os efeitos nocivos do enxofre (S) na produção dos aços e ferros fundidos pois, além das propriedades gerais de dessulfurantes e desoxidantes, contribui para melhorar a qualidade do aço no que tange à maleabilidade, tenacidade e dureza. O silício é adicionado ao aço para aumentar a resistência à oxidação em altas temperaturas, melhorar a temperabilidade e promover o fortalecimento de soluções sólidas. As ligas de níquel e cromo são utilizadas principalmente na produção de aço inoxidável. Além dessas principais ligas, existem as ligas especiais; destacam-se entre elas o ferrotitânio (FeTi), o ferrotungstênio (FeW), o ferronióbio (FeNb) e o ferrovanádio (FeV). O FeTi, que combina as propriedades de resistência e leveza, é alvo da produção de aço para a indústria aeronáutica. O FeW torna o aço maleável e com alta resistência mecânica. O nióbio e o vanádio, concorrem diretamente pelo mesmo mercado, pois ambos agregam resistência a alterações de temperatura (LÚCIA *et al.*, 1999; SCHULTE, 2017; U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1986).

Para produzir as ferroligas, há processos físico-químicos e metalúrgicos definidos e seguidos de acordo com a liga a ser manufaturada, em que se destaca o processo conduzido no interior dos fornos à arco submerso (SAF, na sigla em inglês), sendo um

[1] O AP-42, *Compilation of Air Pollutant Emissions Factors*, foi publicado a partir 1972 como a principal compilação das informações do fator de emissão de poluentes atmosféricos da EPA.

dos principais meios para obtenção do produto (GASIK, 2013; SAHAJWALLA; DUBIKOVA; KHANNA, 2004).

A produção de ferroligas no SAF se dá através da redução carbotérmica de um reagente, um óxido metálico, selecionado conforme a liga desejada no fim da linha operacional. Por exemplo, na produção de ferrocromo alto carbono (FeCrAC), os compostos químicos úteis do minério de cromo para a formação da liga são o óxido de cromo (Cr_2O_3) e óxido de ferro (FeO). A ganga[2] associada ao minério é formada por dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de magnésio (MgO), óxido de cálcio (CaO) e fósforo (P). Nesse tipo de reação química os óxidos úteis para a formação da liga são reduzidos por uma substância portadora do elemento carbono, chamada de agente redutor, e.g. coque metalúrgico ou carvão vegetal, e tem como função remover o oxigênio desses compostos. Após o carregamento do minério e do redutor no SAF, as reações químicas são induzidas sob altas temperaturas para obter a liga FeCrAC (FERBASA, 2016).

De maneira geral, o processo de formação de outras ferroligas derivadas de reações carbotérmicas é similar ao mencionado no exemplo acima, sendo necessário realizar alterações na carga do forno para suprir a demanda e especificação final da liga.

O processo de formação de ferroligas em fornos a arco submerso demandam temperaturas elevadas que são alcançadas com uso intensivo de energia elétrica convertida em energia térmica no interior dos fornos, utilizando eletrodos do tipo Søderberg, majoritariamente (BEUKES *et al.*, 2013; LARSEN; ELKEM CARBON AS, 2012; ROBERTS; PETE; GOODWILL, 1996). Trata-se de um eletrodo contínuo que é formado e consumido durante a operação do forno. O material que alimenta o forno utilizado para a formação do eletrodo é denominado de pasta eletródica, e assume os formatos cilíndricos, bloco ou briquete (BERGSTRØM *et al.*, 1989; LARSEN *et al.*, 2004).

Ao ser inserida no processo, o nível da pasta está sujeito a condições que geram assimetrias que impactam na formação dos eletrodos e podem ocasionar a quebra

[2] Material(is) sem interesse econômico, que constituem o minério.

destes (ROOS, 2011; SKJELDESTAD, 2015). Há também o efeito da segregação, que separa a pasta em duas fases (aglutinante e agregado sólido) e é identificado pela presença de uma poça de baixa viscosidade com brilho metálico, na superfície superior da pasta. A segregação diminui significativamente a eficiência do eletrodo Søderberg, deixando-o mecanicamente fraco e sujeito a quebra após o cozimento (HJORTH; HÖMBERG; ALBADA, 2018; KAMILOVA, 2021; MC DOUGALL, 2013). Além da identificação visual da poça metálica, a segregação pode ser identificada através da medição da temperatura da superfície da pasta, visto que a zona com material segregado apresenta perfil de temperatura superior a condições normais de operação. A pasta também está sujeita ao evento denominado engaiolamento, sendo caracterizado pela presença de bolsões de ar na pasta (AMARO *et al.*, 2001). Esta anomalia pode acarretar segregação e eletrodos malformados por impedir o fluxo de pasta. A verificação que o nível de pasta permanece inalterado entre duas medidas realizadas em intervalos de tempo distintos é um indicador de pasta engaiolada.

Estes distúrbios são de difícil identificação por parte das equipes de operação, ora pela restrição visual e de iluminação, no caso da segregação, ora pelo número insuficiente de medições de nível em pontos distintos, nos demais casos. Colocado este ponto, há interesse por soluções capazes de identificar os distúrbios citados, visto o seu impacto nocivo na formação dos eletrodos e consequentemente, na produção das ferroligas. Nessa conjuntura, o emprego de sistemas especialistas (SEs) apresenta-se como uma alternativa que agrega e estrutura o conhecimento operacional para inferir, de forma assertiva e automática, sobre a ocorrência desses distúrbios.

Os SEs são um subconjunto do campo da Inteligência Artificial (IA) que incorporam o conhecimento humano de especialistas[3] para oferecer soluções para problemas específicos em um determinado domínio ou que são capazes de dar conselhos, de uma maneira comparável ou superior ao de especialistas humanos (LUCAS; VAN DER GAAG, 1991).

[3] Pessoas que acumularam conhecimento exigido à cerca de um processo e dos problemas inerentes a ele.

Ao aplicar um sistema especialista, minimiza-se a dependência dos especialistas humanos, que muitas vezes podem ser raros, caros, ocupados e propensos a erros. Em casos de transição de cargo e remanejamento de equipe, o conhecimento humano pode ser perdido, se não for difundido. Os sistemas especialistas, por outro lado, não apresentam esses revezes, podendo ser aplicados às situações que demandam intepretação[4], diagnóstico[5] e predição[6], por exemplo (HADŽIĆ; FETIĆ; AZIZOVIĆ, 2015).

Um SE consiste tipicamente de dois componentes essenciais: uma base de conhecimento que captura o conhecimento específico do domínio, e uma máquina de inferência composta por algoritmos, para manipulação do conhecimento representado na base (SINGLA; GROVER; BHANDARI, 2014; TAVANA; HAJIPOUR, 2019). Segundo os trabalhos de (NAGORI; TRIVEDI, 2014; TAN, 2017) um dos métodos aplicados e consolidados nessa área é baseado em lógica difusa, também denominada no estado da arte como lógica *fuzzy* ou nebulosa.

Nesse contexto, a lógica difusa é a base do raciocínio do sistema especialista em que o uso de variáveis linguísticas compõe as regras difusas. Por exemplo, na proposição “A temperatura está alta” implica que a variável linguística “temperatura” assume o valor linguístico “alta”. As regras difusas assumem a estrutura IF-THEN de premissa e conclusão para formular as condicionais que compreendem a lógica difusa, como mostra o exemplo a seguir: IF “a temperatura está alta” THEN “ligar ventilador”.

A lógica difusa também é amplamente empregada em escala comercial e laboratorial. Como apontado em (LIN; LEE, 1996), na década de 1990, ela já era aplicada em áreas como controle, reconhecimento de padrões, inferência, entre outras. Uma breve amostra da sua aceitação, é destacada abaixo, em ordem cronológica, com a menção de trabalhos desenvolvidos de SEs e aplicados em áreas distintas.

O trabalho de (HEUNG-JAE LEE *et al.*, 2000) destaca um sistema especialista difuso para diagnosticar diversas falhas que ocorrem em uma rede de transmissão regional

---

[4] Trata-se da interpretação de uma situação ou ocorrência conforme os valores conhecidos das variáveis de entrada.
[5] Trata-se da conclusão que leva um sistema ao regime de estresse ou falha, por exemplo.
[6] Trata-se da previsão do próximo evento ou resultado mais provável em uma determinada situação.

e subestações. Quando ocorre uma falha em um sistema de energia, as informações dos dispositivos de proteção operados são transferidas para o sistema SCADA[7]. Sabe-se que existem relações causais entre uma falha e o relé ou relés de proteção correspondentes, e entre um relé e os disjuntores correspondentes. Essas relações compõem a base de regras do sistema especialista.

No trabalho de (ZHANG *et al.*, 2010) é descrito um sistema especialista difuso que analisa o espectro óptico de um convertedor a sopro de oxigênio, usado no processo de produção de aço em siderúrgicas, com fim de analisar o teor de carbono no metal fundido. Esse processo para a fabricação de aço é altamente complexo e volátil, o que dificulta a obtenção de um modelo satisfatório para estimar o teor de carbono. Uma vez que este processo ainda não é completamente compreendido metalúrgica e quimicamente, a teoria difusa provou ser uma ferramenta muito atraente, a fim de garantir a qualidade do aço e minimizar o consumo de recursos.

Recentemente, o trabalho de (CASAL-GUISANDE *et al.*, 2022) apresentou um sistema especialista, baseado em lógica difusa, para o monitoramento das condições de trabalho de ferramentas de usinagem. Os operários das máquinas de usinagem são muitas vezes encarregados de monitorar muitos parâmetros do processo de usinagem, e geralmente utilizam, entre outros, sinais sonoros de corte, para acompanhamento e avaliação desse processo. Em alguns casos, é frequente encontrar operadores que não demonstram a expertise e as habilidades necessárias para avaliar adequadamente o grau de desgaste da ferramenta, e por isso, com o objetivo de ampliar as capacidades de avaliação do operador, a metodologia propôs um sistema que envolve o processamento de áudio para determinar comportamentos indesejáveis existentes em ferramentas de usinagem, reduzindo assim erros, acidentes e falhas prejudiciais.

Diante do exposto, este trabalho apresenta uma abordagem de um sistema especialista difuso para a inferência dos três riscos potenciais na formação do eletrodo Søderberg. O processo de formação da base de dados, consiste no desenvolvimento de um sistema de multimedição de nível e temperatura da pasta eletródica, doravante

[7] SCADA é a sigla em inglês para *Supervisory Control And Data Acquisition* que é traduzido para o português como Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados.

denominado tampa inteligente[8], responsável por medir e armazenar esses dados da superfície da pasta. Estas medições foram coletadas na fábrica de uma companhia de ferroligas nacional, cujo nome será preservado. Na estruturação da máquina de inferência este sistema emprega o conhecimento dos especialistas de operação do forno a arco submerso para relacionar as variáveis medidas e compor as regras difusas.

Ao final deste trabalho, os resultados destacam as inferências realizadas para as três saídas que estimam o grau de simetria de pasta, o potencial de segregação e engaiolamento, respectivamente. O resultado considera como entrada dados reais de processo de nível e temperatura coletados pela tampa inteligente, que foram processados para serem inseridos no SE.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 **Geral**

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema especialista baseado em lógica difusa para detecção de riscos potenciais na formação do eletrodo Søderberg em fornos a arco submerso.

1.1.2 **Específicos**

- Testar *in loco* com sensor de temperatura (minicâmera térmica) e coleta de informações de operação do forno.

- Projetar, montar e instrumentar o dispositivo para aquisição de dados relativo à pasta eletródica;

- Realizar testes de integração dos sensores e armazenamento dos dados coletados;

---

[8] O projeto e execução deste protótipo sucedeu-se via subvenção do edital FAPES Nº 01/2020 APOIO A PROJETOS INOVADORES E SPIN OFF e foi supervisionado pela VAMTEC GROUP, proponente do projeto e produtora de pasta eletródica, e executado pela GAINTECH TECNOLOGIA. O autor deste trabalho atuou como bolsista de Pós-Graduação - Mestrado – ME, sendo também membro da equipe executora.

- Instalar o dispositivo no forno de um produtor de ferroligas;
- Definir os conjuntos difusos de entrada e saída do sistema especialista;
- Definir a base regras difusas que descrevem o comportamento dos riscos potenciais na formação do eletrodo;
- Tratar e analisar os dados aquisitados;
- Implementar o código para execução do sistema especialista;
- Avaliar os resultados da saída do sistema;

1.2 METODOLOGIA

Teste *in loco* com sensor de temperatura (minicâmera térmica) e coleta de informações de operação do forno: Esta etapa consistiu na visita à companhia de ferroligas para levantar informações com os operadores a respeito do processo de formação dos eletrodos e da produção de ferroligas. Concomitantemente, testou-se o modelo de minicâmera térmica a ser empregada na tampa inteligente, com objetivo de verificar sua performance sob as condições do ambiente da fábrica produtora de ferroligas.

Projeto, montagem e instrumentação do dispositivo para a aquisição de dados relativo à pasta eletródica: Esta etapa do trabalho destinou-se à montagem estrutural do protótipo denominado “tampa inteligente”, assim como sua instrumentação, para integrar os elementos de hardware necessários para a aquisição apropriada dos dados de nível e temperatura da superfície da pasta eletródica.

Realização de testes de integração dos sensores e armazenamento dos dados coletados: A finalização da instrumentação da tampa inteligente, foi seguida pelos testes de sensores que verificaram a operacionalidade da tampa com todos os elementos integrados. Estes testes compreenderam a implementação e otimização do código de aquisição de dados, análise das medições dos sensores, análise do

armazenamento e sincronismo das medições no banco de dados e determinação da autonomia da bateria do sistema.

Instalação do dispositivo no forno de um produtor de ferroligas: Assim que os testes em laboratório finalizaram, a tampa inteligente instrumentada foi transportada para uma companhia nacional, produtora de ferroligas. Nas dependências da empresa, a tampa foi içada, repousada sobre o topo da coluna de eletrodo em um forno à arco submerso.

Definição dos conjuntos difusos de entrada e saída do sistema especialista: Em conjunto com os especialistas do processo de produção de ferroligas e estado da arte, foi definido o formato das funções de pertinência adequadas para a representação dos conjuntos difusos de entrada e de saída do sistema.

Definição da base regras difusas que descrevem o comportamento dos riscos potenciais na formação do eletrodo: Em conjunto com os especialistas do processo de produção de ferroligas e material do estado da arte, verificou-se como as variáveis coletadas relacionavam-se entre si durante a ocorrência dos riscos potenciais na formação do eletrodo. Da mesma maneira, é desejado estabelecer essa relação em condições ideais de operação. Com essas informações extraídas, foram definidos o conjunto de regras do sistema especialista baseado em lógica difusa.

Tratamento e análise dos dados aquisitados: As medidas dos sensores armazenadas foram consultadas no banco de dados e formatadas para se adequarem aos tipos de dados pré-definidos. Essa formatação foi necessária para tratamento posterior das medições e validação do sistema especialista.

Implementação do código para a execução do sistema especialista: Os módulos do sistema especialista foram implementados em linguagem de programação Python.

Avaliação dos resultados da saída do sistema: Os resultados do sistema implementado foram analisados para verificar se as inferências de riscos potenciais na formação do eletrodo Søderberg eram coerentes com os dados de entrada. É esperado que a saída seja representativa, de forma que o conjunto tampa inteligente e sistema especialista pudessem ser apresentados para os produtores de ferroligas

como uma ferramenta auxiliadora na detecção destes eventos danosos e que poderiam ser tratados de imediato.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este texto está organizado em 5 capítulos. No capítulo 1, foi traçada uma breve introdução sobre as ferroligas, sua formação em fornos a arco submerso e relevância para agregar propriedades mecânicas distintas na produção de aço. Nesse mesmo capítulo são expostos os três riscos potenciais na formação do eletrodo Søderberg. No capítulo 2, é retratada a fundamentação teórica necessária para a compreensão da operação de um forno a arco submerso na produção de ferroligas e um aprofundamento sobre os riscos existentes. Soma-se a esse capítulo a apresentação de conceitos e a arquitetura geral de um sistema que emprega a lógica difusa. No capítulo 3, é evidenciado o desenvolvimento da tampa inteligente, incluindo os resultados de testes e a estrutura do sistema especialista sugerido. O capítulo 4 apresenta os resultados do SE na inferência dos três riscos potenciais, considerando dados reais de processo na entrada do sistema. Por fim, o capítulo 5 destaca as conclusões e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos principais dos fornos elétricos a arco submerso, passando por sua parte construtiva, princípios de operação para a extração das ferroligas e as problemáticas relativas à formação dos eletrodos. Por fim, destaca-se os principais tópicos introdutórios da lógica difusa.

2.1 FORNOS ELÉTRICOS A ARCO SUBMERSO (SAF)

Esta seção expõe os elementos estruturais que compõem os fornos elétricos a arco submerso, além de frisar etapas do processo, desde o carregamento da carga no forno até o vazamento da ferroliga, e a importância do posicionamento dos eletrodos para maior eficiência energética do sistema.

2.1.1 **Elementos constituintes do SAF**

O forno a arco submerso consiste em uma carcaça revestida de refratário, geralmente resfriado a água em tamanhos maiores, coberto por uma abóbada, através da qual um ou mais eletrodos entram no forno. Os eletrodos são os condutores de eletricidade e energia necessários para decorrer a redução do(s) minério(s) por efeito dos redutores carbotérmicos. O objetivo principal dos eletrodos é induzir calor ao forno para a operação de fundição. O termo “arco submerso” é usado porque as pontas dos eletrodos são posicionadas de forma a penetrar na camada de carga do forno, e nesta zona ocorre o processo de redução (ROBERTS; PETE; GOODWILL, 1996).

Com base nos trabalhos de (AMADI, 2012; FRIEDRICH *et al.*, 2018; NATH, 1994; ROBERTS; PETE; GOODWILL, 1996; SHEFFIELD ASSAY OFFICE, 2019; TRAUSTASON, 2020) o forno a arco submerso pode ser dividido nas seguintes seções:

- Carcaça (*shell*): consiste na carcaça e paredes laterais de aço que delimitam o forno. Possui formato circular ou retangular com furos separados para o vazamento de escória e da ferroliga fundida. Dependendo do projeto do forno, a escória e a ferroliga são extraídos através do mesmo furo de corrida e separados posteriormente. Se necessário o resfriamento adicional da carcaça, esse estágio ocorre por um sistema de resfriamento à água nas paredes

laterais. O fundo da carcaça também pode ser resfriado por ventilação de ar forçada.

- Soleira (*hearth*): consiste no material refratário que reveste a parte inferior do interior carcaça.

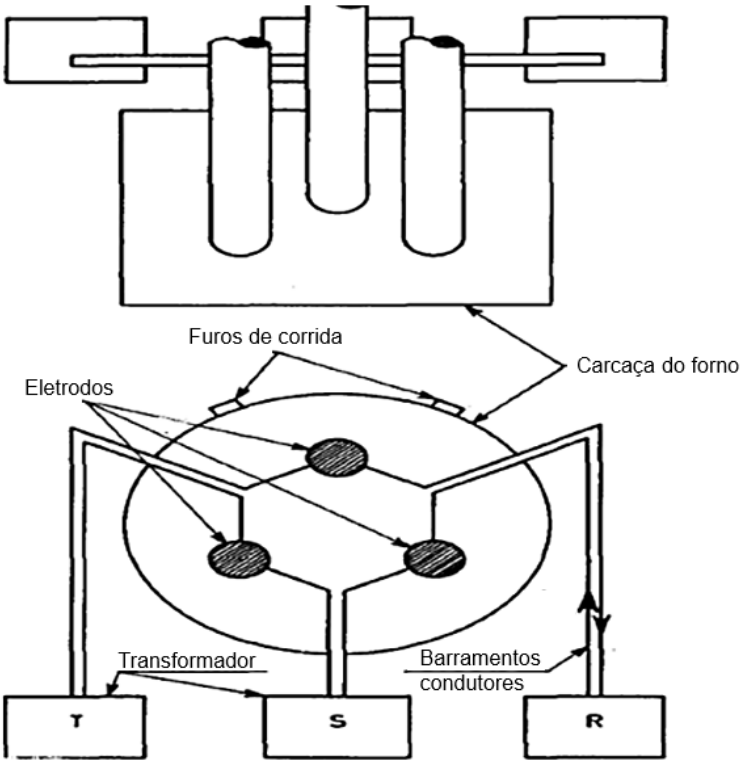
- Transformador (*Transformer*): Em fornos de ferroligas, os transformadores são usados para reduzir a alta tensão, entre 11 KV e 33 KV, para a baixa tensão desejada, a ser fornecida aos eletrodos, entre 160V e 280V. Isso resulta em correntes secundárias maciças com magnitude de kA fluindo no circuito secundário. A variação na tensão secundária é frequentemente desejada devido a diferentes requisitos de entrada de energia no início do forno e durante o processo de formação da liga.

  Um forno de corrente alternada típico é alimentado por um sistema elétrico trifásico e, portanto, possui três eletrodos que são normalmente conectados em arranjo Knapsack, em que, tipicamente, três transformadores monofásicos são acoplados em uma conexão delta com três circuitos secundários trazidos separadamente de cada transformador usando condutores flexíveis para permitir o movimento vertical dos eletrodos, como apresentado na Figura 1.

  A vantagem desse arranjo é que a corrente do eletrodo é $\sqrt{3}$ vezes a corrente secundária do transformador. Como as correntes dos eletrodos em um forno de grande porte excedem 100 kA, isso representa uma grande vantagem na construção do transformador (TOIVONEN, 1993). Este tipo de conexão minimiza a reatância no sistema de barramento secundário. Os condutores são alinhados de tal forma a minimizar a área do fluxo magnético e, portanto, a indução (SAEVARSDOTTIR *et al.*, 2013).

  A energia é conduzida até o interior do forno para formar o arco elétrico que se estabelece entre a carga e a ponta dos eletrodos, com a carga sendo aquecida tanto pela corrente que flui através dela quanto pela energia radiante emanada pelo arco que pode atingir temperaturas próximas a 3000 ºC. O sistema de regulação mantém a entrada de corrente e energia aproximadamente constante durante a fusão da carga.

Figura 1 - Conexão Knapsack típica em um SAF trifásico.



Fonte: Adaptado de (AMADI, 2012).

- Coluna do eletrodo (*electrode column*): A energia elétrica é normalmente transferida dos transformadores do forno através de linhas de alta corrente, que são flexíveis, resfriados a água, e conduzem a energia elétrica até as placas de contato dos eletrodos[9]. Essa energia é conduzida para o interior do forno por meio de eletrodos de carbono ou de grafite, normalmente dispostos centralmente (eletrodo único) ou como triângulo (três eletrodos). Os eletrodos são deslizados automaticamente[10] até a camada de carga do forno, sem interrupções na operação do forno. As partes constituintes da coluna do eletrodo contêm todas as facilidades para segurar, escorregar, retroceder e regular a penetração na carga. Todas as operações nos eletrodos são executadas hidraulicamente.

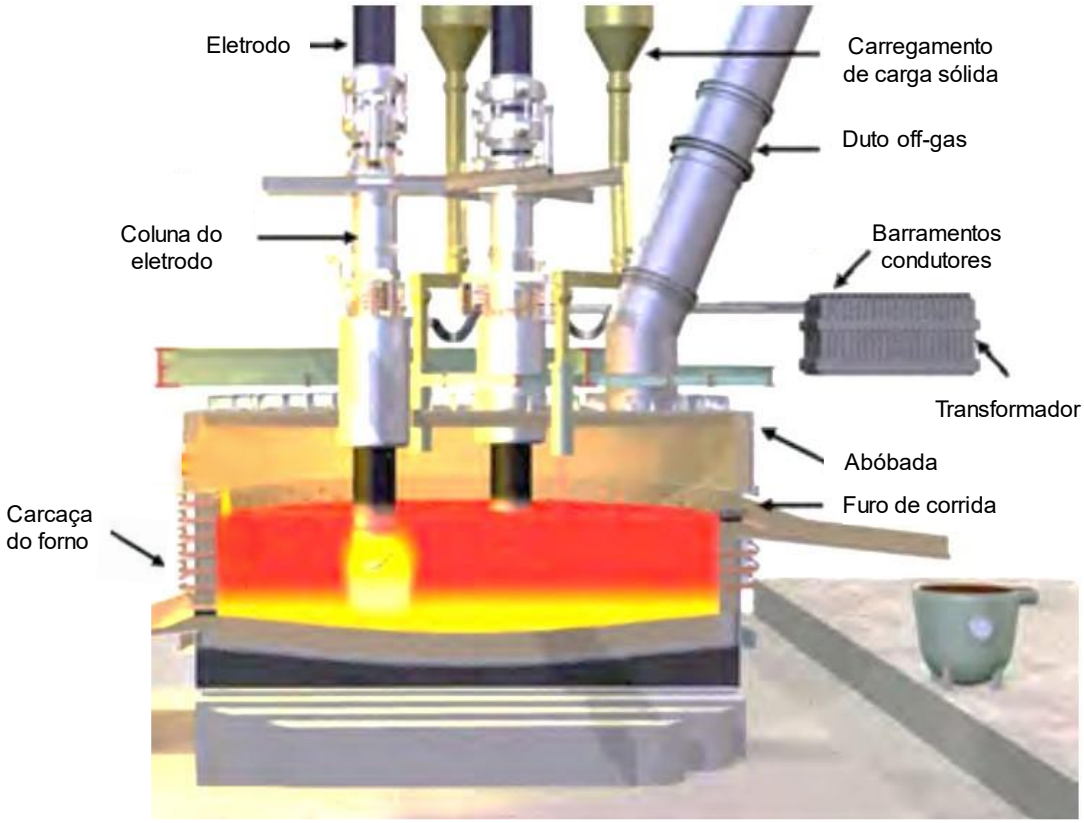
[9] A seção 2.1.3 apresenta maior nível de detalhamento da coluna do eletrodo, destacando sua operação.
[10] Também pode ser executado o deslizamento manual, através de comando da sala de operação.

- Abóbada (*roof*): revestido de refratário ou refrigerado a água, sendo esférico ou em tronco (seção cônica). Compreende todas as aberturas e vedações necessárias para as colunas de eletrodos, carregamento da carga e dutos para saída de gases do processo.

- Duto de retirada de efluentes gasosos (*off-gas duct*): os gases de processo criados a partir das reações químicas são expelidos pelo duto *off-gas* conectado à abóbada do forno. Dependendo do projeto da planta, os gases de processo são queimados dentro do forno ou fora do forno. Se o processo gerar efluentes gasosos que contenham uma certa concentração de CO (monóxido de carbono) no gás de processo ou outras substâncias perigosas que colocam em risco a saúde e segurança dos operadores, o forno é projetado como um tipo de forno fechado.

A Figura 2 apresenta uma ilustração unificada dos elementos constituintes de um projeto típico de um SAF. Destaca-se que outras opções de projeto que atendem os requisitos individuais de processos específicos, podem diferir da ilustração a seguir.

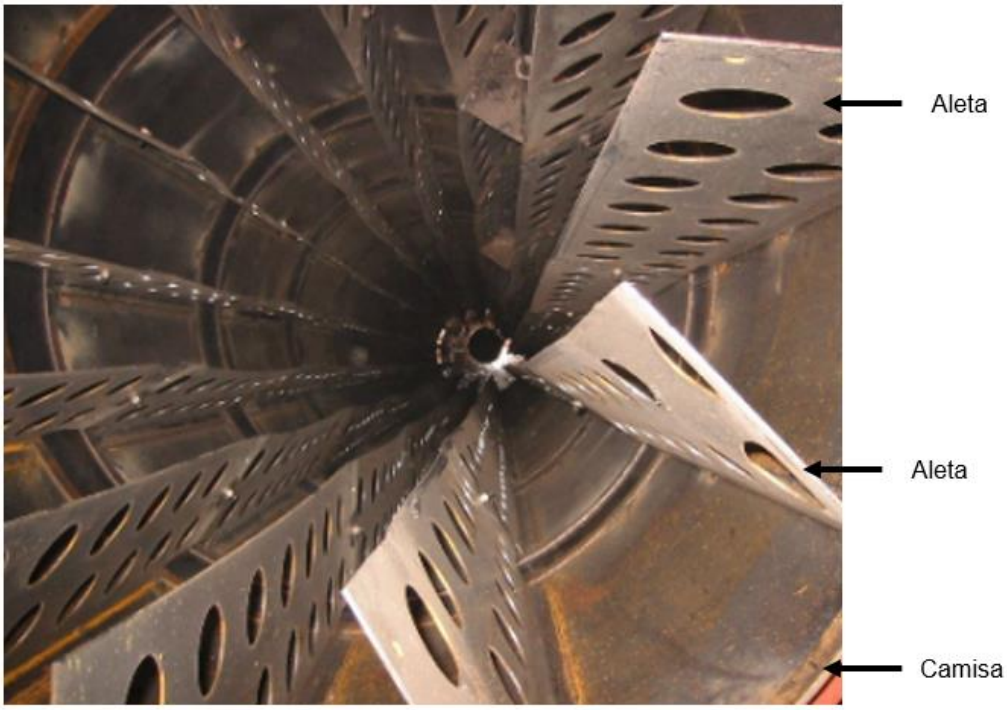
Figura 2 - Principais partes constituintes de um forno a arco submerso.



Fonte: Adaptado de (FRIEDRICH *et al.*, 2018).

A saber, a coluna retrata a estrutura mecânica de suporte e deslizamento do eletrodo, assim como o sistema que transfere a energia proveniente do secundário do transformador para ser convertida em calor no interior do SAF. As linhas de alta corrente são conectadas às placas de contato que pressionam o cilindro de aço, chamado de camisa, que serve como molde para a pasta eletródica. Como indica a Figura 3, a camisa[11] possui aletas longitudinais, que além de sustentar mecanicamente o eletrodo cozido, são responsáveis por transferir a corrente elétrica da superfície da camisa para o interior do eletrodo. As placas de contato são fixadas no eletrodo por meio de um anel de pressão projetado para forçá-las contra a camisa a fim de fornecer um bom contato elétrico para a transferência de corrente (GASIK, 2013).

Figura 3 - Vista superior do interior da coluna do eletrodo.



Fonte: Adaptado de (NELSON; PRINS, 2004).

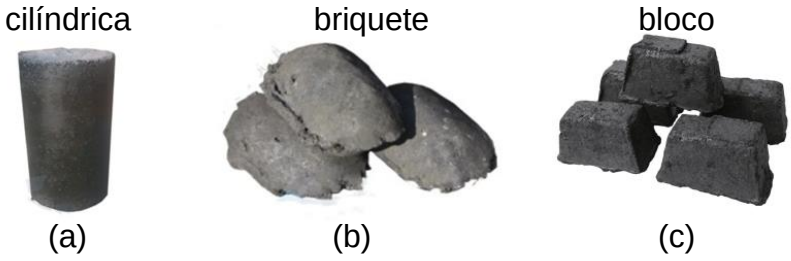
[11] A camisa não é formada por um bloco cilíndrico único, mas por seções cilíndricas que são soldadas entre si, em intervalos de tempo regulares. Essa reposição é necessária, pois a intensidade do calor próximo à ponta do eletrodo também consome a camisa durante a operação do SAF.

2.1.2 **Operação do SAF**

Na operação de um SAF, dois tipos de eletrodos podem ser utilizados: carbono amorfo ou grafite. Os eletrodos de carbono amorfo são divididos em mais duas classes, i.e, eletrodos Søderberg e pré-cozidos[12] (CHATTERJEE, 1994). O eletrodo Søderberg se mantém como o mais empregado para o fornecimento de energia na produção de ferroligas em SAFs (LARSEN; ELKEM CARBON AS, 2012) devido ao custo reduzido de ao menos 8% em relação aos eletrodos de carbono amorfo pré-cozidos (ROBERTS; PETE; GOODWILL, 1996); seu diâmetro, comparado aos eletrodos pré-cozidos, pode ser aumentado para fornos maiores e não requerer desligamentos do forno para deslizar os eletrodos (BEUKES *et al.*, 2013).

A pasta eletródica utilizada para a formação do eletrodo Søderberg é manufaturada em formatos cilíndricos, blocos ou briquetes (BERGSTRØM *et al.*, 1989; LARSEN *et al.*, 2004), destacados na Figura 4, e sua composição contém o aglutinante, piche de alcatrão, misturado com o agregado sólido, e.g., antracito calcinado ou coque (GLASTONBURY *et al.*, 2021). Durante a operação do forno, a pasta é adicionada periodicamente no topo da coluna do eletrodo para que, posteriormente, seja cozida e forme o eletrodo. Logo, trata-se de um eletrodo que é formado continuamente.

Figura 4 - Formatos típicos de pasta eletródica.



Fonte: 4(a) e 4(b) adaptado de (RIZHAO HENGQIAO CARBON CO., 2023). 4(c) adaptado de (MORKIN CARBON, 2023).

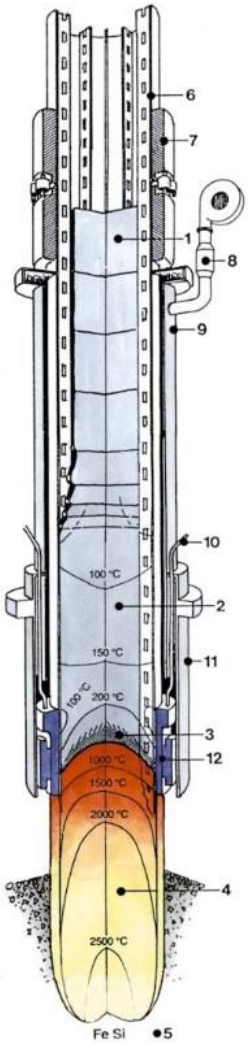
[12] O conceito de pré-cozido refere-se ao estado que antecede o cozimento da pasta eletródica. O termo ‘eletrodo cozido’ remete ao eletrodo em formato sólido e com alta capacidade de conduzir corrente elétrica. O cozimento ocorre naturalmente no interior da coluna do eletrodo devido ao seu aquecimento em que a pasta é amolecida e, posteriormente, solidificada.

Após o carregamento da pasta, dá-se início o seu derretimento[13] entre 50 ºC e 100 °C (VAN GORDER *et al.*, 2021), como destaca a Figura 5. A seção em que a pasta é cozida[14] completamente é chamada de zona de cozimento e ocorre à temperatura[15] entre 400 °C e 500 °C (BERGSTRØM *et al.*, 1989; SHOKO; BEUKES; STRYDOM, 2013). Nessa fase, o eletrodo cozido apresenta alta condutividade elétrica, viabilizando a condução de níveis elevados de corrente até a ponta dos eletrodos para a formação do arco elétrico.

Figura 5 - Gradiente de temperatura ao longo da coluna do eletrodo.

Legenda:

1 – Pasta em formato cilíndrico
2 – Pasta derretida
3 – Zona de cozimento
4 – Eletrodo cozido
5 – Zona de formação da liga
6 – Camisa com aletas
7 – Anéis de deslizamento
8 – Ventiladores de ar
9 – Suspensão da camisa
10 – Tubos condutores de corrente
11 – Escudo térmico
12 – Placas de contato



Fonte: Adaptado de (SKJELDESTAD *et al.*, 2015).

[13] A faixa de derretimento de pasta pode variar conforme matéria prima empregada pelo fornecedor para formar a pasta. Independente do formato da pasta, espera-se que até 110°C ela esteja amolecida.
[14] Até alcançar esse estado a pasta derrete e flui para os espaços vazios no interior na camisa.
[15] A faixa de temperatura na qual a pasta é cozida, é chamada de isotérmica de cozimento.

Os arcos elétricos nos SAFs são formados à pressão atmosférica e a temperatura do arco em um SAF está acima de 20.000 K (19727 ºC), o que significa que o calor liberado no arco pode suportar reações que exigem temperaturas extremamente altas. Devido à dissipação resistiva, o calor é transportado do arco para seu ambiente, principalmente por convecção e radiação (GASIK, 2013).

Com o eletrodo Søderberg sendo de origem carbonácea, este é consumido no SAF e para compensar a erosão da sua ponta, ele é submetido ao processo chamado de deslizamento do eletrodo. Nessa etapa, há dois anéis de deslizamentos que operam em conjunto e a sequência de ações destacada no trabalho de (JORDAN; HOCKADAY, 2013) é abordada abaixo, seguida de uma ilustração na Figura 6 que ressalta o sistema de deslizamento do eletrodo, assim como demais elementos constituintes da coluna:

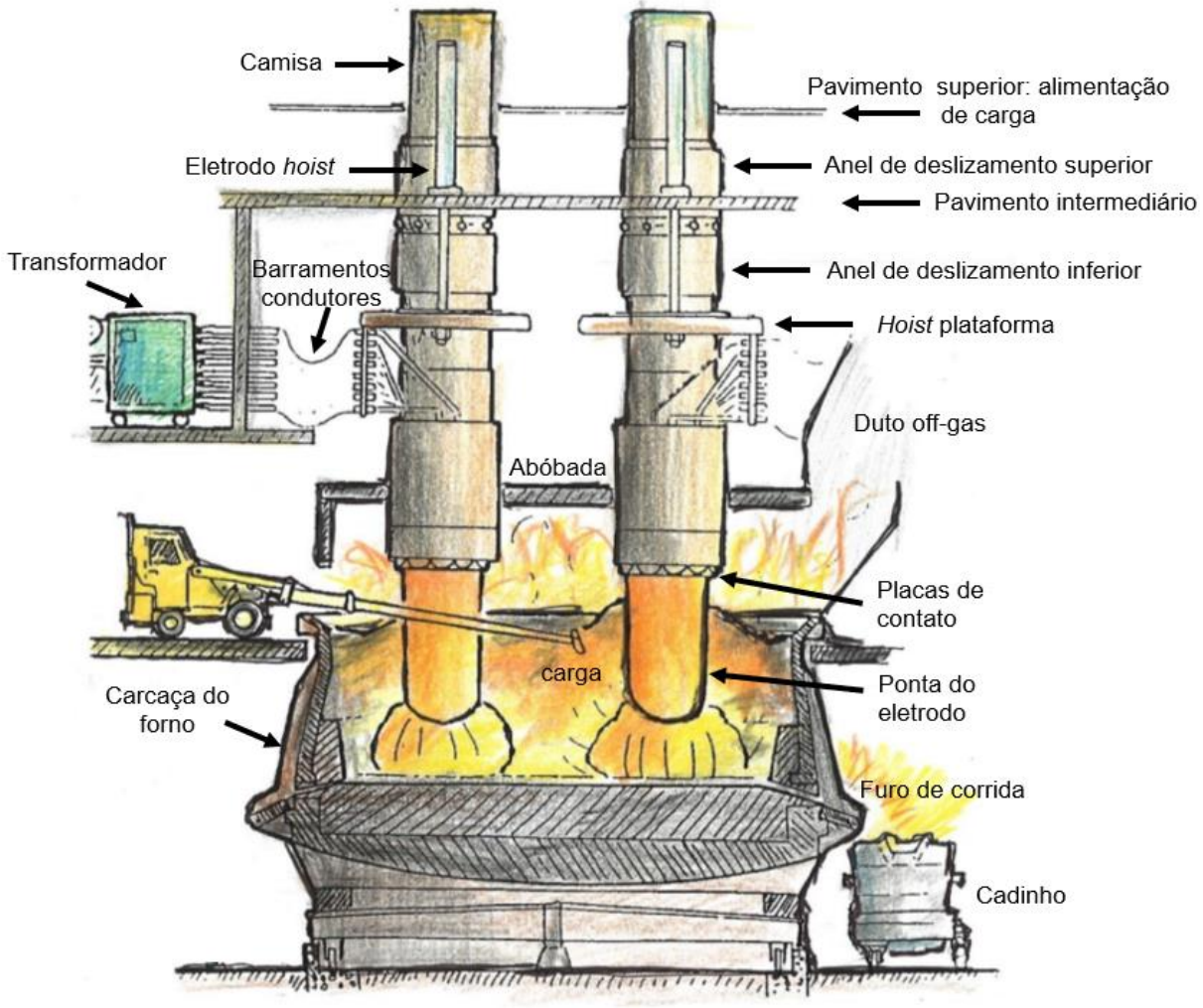
- O anel de deslizamento superior mantém o eletrodo pressionado.
- O anel de deslizamento inferior libera o eletrodo.
- Os guindastes (*hoists*) hidráulicos que suspendem o anel de deslizamento inferior, movem-se para cima, fazendo com que o eletrodo se mova para baixo através do anel.
- O anel de deslizamento inferior volta a pressionar o eletrodo.
- Por fim, o anel de deslizamento superior libera o eletrodo.

Os métodos de deslizamento de eletrodos variam de forno para forno, mas tendem a seguir a mesma sequência básica.

Esse processo ocorre em distâncias relativamente pequenas, na ordem de 1 mm a 3 mm por hora. Deslizamentos mais longos (forçados) são feitos se ocorrer uma quebra do eletrodo ou se o eletrodo for mais curto do que o ideal para a operação do forno.

No fim do processo, a ferroliga e escória são acumulados no forno até que ocorra o vazamento através do furo de corrida do forno para o cadinho, em intervalos apropriados (Figura 6).

Figura 6 - Ilustração simplificada das partes constituintes da coluna do eletrodo.



Fonte: Adaptado de (HANNESSON, 2016).

2.1.3 **Controle de posicionamento do eletrodo**

Em um forno de arco submerso os eletrodos penetram na carga do forno e a zona de reação ocorre próximo a ponta dos eletrodos.

A carga é aquecida à medida que desce no forno e isso resulta em uma redução na sua resistência elétrica[16]. Em altas temperaturas, a resistência é suficientemente baixa para permitir uma condução significativa, de modo que a corrente possa fluir através dos eletrodos em um forno (STEWART, 1980).

[16] A resistência elétrica da carga de um SAF é medida em mΩ.

Conforme o trabalho de (AMADI, 2012), a resistividade da carga é dependente dos seguintes fatores físicos do SAF:

- O comprimento dos eletrodos[17];
- A distância da ponta dos eletrodos em relação ao banho metálico;
- A profundidade do eletrodo na carga;

Segundo (JACCARD, 2005), há uma posição H de penetração do eletrodo na qual as reações químicas são realizadas mais eficientemente, de acordo com a carga do forno. Quando o eletrodo está nessa posição, a potência específica (kW/ton) transferida para a carga, na zona de reação, é a ideal. Nas demais posições, o consumo de energia aumenta e ocorre a deposição de materiais indesejáveis sobre a soleira do forno.

Com objetivo de alcançar maior eficiência energética, a maneira comum de controlar a resistência da carga é operar o forno com corrente constante dos eletrodos, ajustando suas posições e, ao mesmo tempo, mantendo uma carga constante do forno, com a resistência de operação sendo selecionada pelos operadores do forno dentro de certos limites, determinados pela composição da mistura do forno, para obter uma penetração satisfatória dos eletrodos e boas condições de vazamento. Para um determinado processo com carga definida, é uma questão de experiência definir a resistência operacional ideal (MAGNUSSEN, 2018).

Do ponto de vista de otimização energética, o posicionamento adequado da ponta dos três eletrodos, em um forno trifásico, acarreta níveis operacionais desejados para que o forno trabalhe em sua máxima eficiência. Portanto, o controle de posição dos eletrodos, realizado pela malha de controle do SAF, através dos deslizamentos, é fundamental para que a carga seja completamente fundida, levando a redução dos minérios.

[17] No caso de fornos trifásicos, i.e, presença de três eletrodos.

2.2 RISCOS POTENCIAIS PARA A FORMAÇÃO DO ELETRODO SØDERBERG

Esta seção ressalta as problemáticas que ocorrem durante o processo de formação do eletrodo Søderberg.

2.2.1 **Simetria do nível da pasta eletródica**

Sob a perspectiva operacional, é importante manter a uniformidade ou simetria do nível da pasta para a formação regular do eletrodo. O princípio básico de alimentação de pasta é manter o nível de pasta sólida, constante e regular. A alimentação assimétrica pode gerar quebras duras (*hard breakage*[18]) devido a forças mecânicas laterais desequilibradas no eletrodo (ROOS, 2011; SKJELDESTAD, 2015). Além disso, o monitoramento do nível, em intervalos de tempo regulares, também é uma métrica quantitativa para a indicação da densificação da pasta em colunas de briquetes.

A Figura 7 compara duas situações ilustrativas para colunas de eletrodos alimentadas com pasta no formato bloco no centro e briquetes entre as aletas. O cenário apresentado à esquerda da Figura 7 destaca a assimetria de nível de pasta, realçando o desnível da camada de briquetes. Em contramão, o cenário à direita representa um estado operacional desejado, i.e, com a camada de briquetes uniforme.

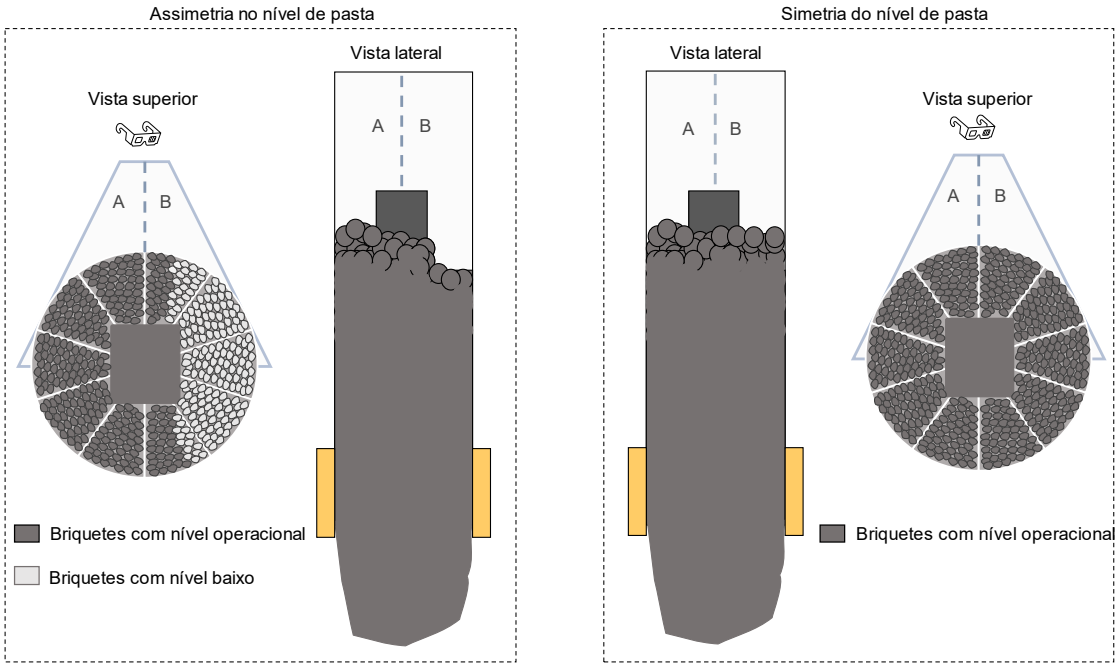
Quando a pasta é alimentada no topo da coluna, seu nível varia durante a operação do forno em função do aquecimento ao longo da coluna. Essa variação é um fator importante para monitorar, pois está associado ao processo de formação do eletrodo.

Não foram encontradas referências que relatem um sistema automatizado que monitore o nível de pasta nos fornos a arco submerso. A medição de nível nas companhias de ferroligas é realizada manualmente com auxílio dos operadores dos fornos, em intervalos de tempo pré-definidos para que seja realizado o cálculo do volume de pasta de alimentação necessária para manter o *set-point* no nível das colunas dos eletrodos.

---

[18] Tipo de quebra que parte do eletrodo cozido cai no interior do forno (VAN GORDER *et al.*, 2021).

Figura 7 - Comparação ilustrativa entre nível de pasta assimétrico e uniforme.



Fonte: Autor (2023).

2.2.2 **Segregação da pasta eletródica**

A segregação refere-se à separação entre o aglutinante e agregado que originalmente compõem a pasta eletródica Søderberg. Está normalmente associada a SAFs que empregam pasta nos formatos cilíndricos ou bloco. Segundo (KAMILOVA, 2021), o fenômeno não é bem compreendido, mas sabe-se que começou a ser detectado a partir de mudanças de projeto que levaram a um menor espaço entre os condutores de cobre, que conduzem a corrente para as placas de contato e camisa, resultando em indução elétrica indesejada dentro do cilindro ou bloco. O calor induzido na pasta sólida, provoca elevação da temperatura na zona que a pasta começa a amolecer, levando a separação em duas fases da mistura original. Quando ocorre a segregação, é característico a existência de uma poça de baixa viscosidade, com brilho metálico, formada pelo aglutinante, circundando a pasta sólida no centro da coluna. Consequentemente, o agregado sólido tende a acomodar-se em uma camada inferior, mais próximo da zona de cozimento.

Quando o eletrodo está operando corretamente, não há segregação. Ou seja, o aglutinante permanece bem misturado com o agregado sólido à medida que toda pasta amolece e se expande para encher o espaço limitado pela camisa e

aletas (HJORTH; HÖMBERG; ALBADA, 2018). Os exemplos na Figura 8 destacam a captura da vista superior no topo da camisa. Note que a imagem à direita, apresenta a poça de brilho metálico ao redor do bloco, no centro, caracterizando a segregação. A imagem à esquerda revela o processo de operação normal na formação do eletrodo, com a ausência da poça.

Figura 8 - Diferença entre eletrodo afetado pela segregação (imagem à direita, n°2) e eletrodo operando em condições normais (imagem à esquerda, n° 6).

Fonte: Retirado de (HJORTH; HÖMBERG; ALBADA, 2018).

A segregação diminui significativamente a eficiência do eletrodo Søderberg, deixando-o mecanicamente fraco e sujeito a quebra após o cozimento (KAMILOVA, 2021; MC DOUGALL, 2013).

Briquetes podem ser adicionados em eletrodos segregados para acrescentar pasta entre as aletas da camisa. Segundo (SKJELDESTAD, 2015), a adição de briquetes provavelmente não resolverá o problema, mas pode ajudar a lidar com as consequências da segregação. Os trabalhos de (AMARO *et al.*, 2001; LARSEN *et al.*, 2004) reforçam o uso de briquetes para minimizar o efeito indesejado.

Ao se trabalhar com a pasta nesse formato é indispensável o amolecimento e densificação adequados dos briquetes para que haja boa performance do eletrodo. A pasta amolecida deve formar uma camada viscosa e densa com intenção de prevenir o movimento ascendente dos gases provenientes do processo de cozimento. Em

condições normais de operação, os gases saem por baixo das placas de contato. Por isso, é condição necessária manter o nível de pasta altamente viscosa, estável e espessa (LARSEN *et al.*, 2004).

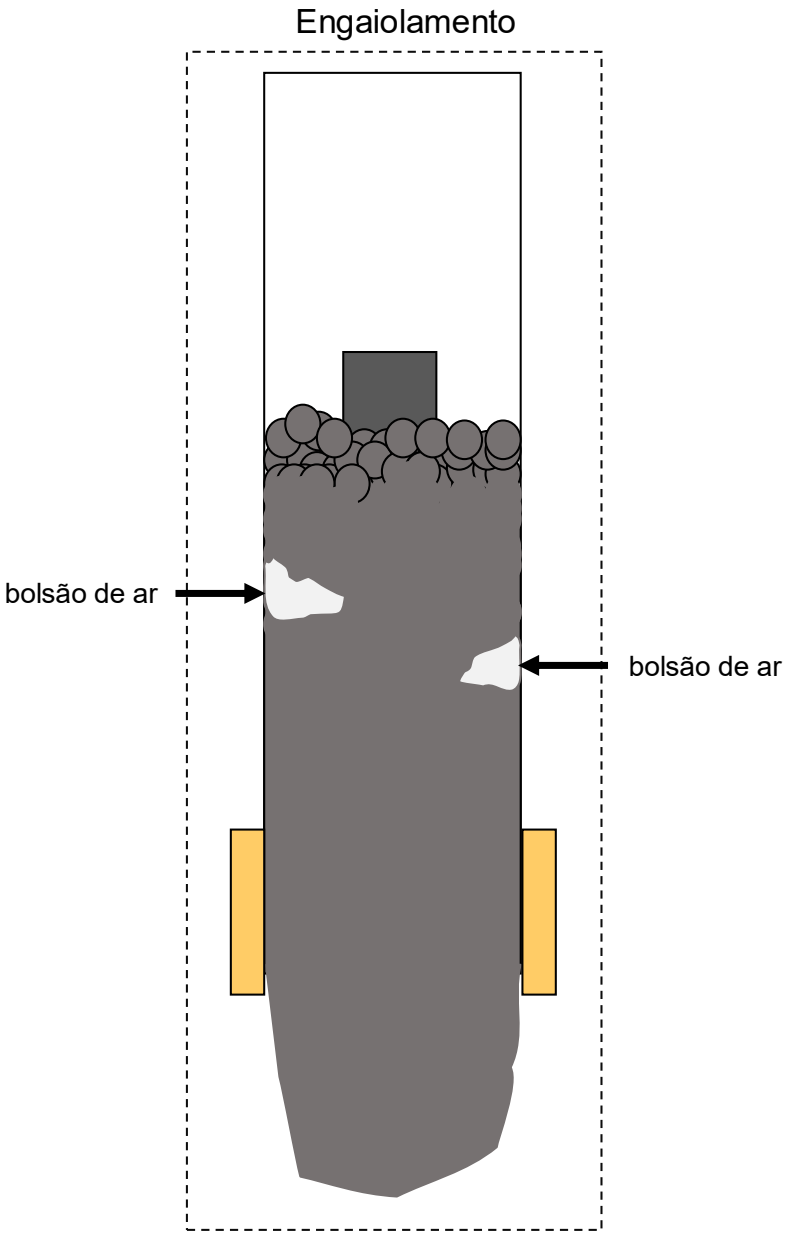
De maneira geral, o monitoramento da segregação demanda recursos de iluminação e câmera adequados para detectar a superfície da pasta líquida, com brilho metálico característico, visto que esta análise é realizada a partir do topo da coluna dos eletrodos. Sabe-se que um dos meios de alertar a presença desse evento é através da medição da temperatura da superfície da pasta, visto que a zona com o material segregado apresenta um perfil de temperatura superior em relação a pasta sólida.

2.2.3 **Engaiolamento**

No trabalho de (AMARO *et al.*, 2001) é destacado que a principal preocupação ao se empregar briquetes no processo de formação do eletrodo é a formação de pontes (em inglês, *bridges*) que interrompem o fluxo de pasta na coluna. Este evento, também retratado no ambiente operacional como engaiolamento, causa bolsões de ar na pasta e acarreta maior aquecimento da pasta amolecida e por consequência diminui a viscosidade das camadas superiores, acarretando segregação e eletrodos malformados.

A Figura 9 destaca um exemplo ilustrativo do evento de engaiolamento, realçando as bolsas de ar que são danosas à formação do eletrodo.

Figura 9 - Exemplo ilustrativo do efeito do engaiolamento.



Fonte: Autor (2022).

Em condições normais de operação é desejado manter o fluxo contínuo de briquetes no interior das colunas sem engaiolar e que forme uma camada de alta viscosidade acima das placas de contato, de modo a evitar que os gases, oriundos do processo de redução do SAF, subam por dentro da coluna (LARSEN *et al.*, 2004).

As causas de engaiolamento são retratadas a seguir:

- Níveis de pasta de briquetes muito elevados;
- Seções de camisas projetadas e instaladas incorretamente, com obstáculos ao fluxo de briquetes na coluna;
- Alimentação irregular da pasta;
- Baixa temperatura na parte superior da coluna;
- Briquetes muito grandes para o espaço disponível entre aletas;

O engaiolamento é detectado durante as tomadas de medições de nível da pasta. A manutenção do nível de briquetes inalterado entre duas medidas do nível de briquetes, é um indício forte da presença desta perturbação no processo de formação do eletrodo. Após sua constatação na coluna, o engaiolamento pode ser suprimido através de uma das seguintes medidas adotadas pela equipe de operação do SAF:

- Aumentar a temperatura de ar na parte superior da coluna através de aquecedores;
- Diminuir o nível de pasta de briquete e na realimentação seguinte, reduzir o volume de carga de pasta;
- Através do topo da coluna, impactar a camada superior de briquetes com um material de massa considerável para forçar os briquetes a preencher o espaço vazio causado pelo engaiolamento.

2.3 LÓGICA DIFUSA

A lógica difusa, *fuzzy* ou nebulosa é um método que provê uma forma sistemática de converter uma base de conhecimento em um mapeamento não linear. Por conta disso, é possível introduzir o conhecimento humano, expresso em linguagem natural, em aplicações de engenharia para tomadas de decisão ou para controle de sistemas dinâmicos (SIMÕES; SHAW, 1999).

Operadores treinados podem lidar com plantas industriais com processos cuja dinâmica não é bem conhecida. Devido à sua experiência e conhecimento, esses operadores sabem quais ações devem ser tomadas, quando observadas certas condições do processo, como uma combinação de leitura de instrumentos de medição, padrões de indicadores luminosos e sonoros, entre outros eventos. A vantagem da lógica difusa é permitir que regras sejam formalizadas para capturar as estratégias de operadores humanos.

2.3.1 **Conjuntos difusos**

A maioria das ferramentas tradicionais de modelagem formal, raciocínio e computação são *crisp*[19], i.e, dicotômico. Pode-se citar o exemplo da teoria dos conjuntos clássicos, em que um elemento pode pertencer a um conjunto ou não. A precisão assume que os parâmetros de um modelo representem exatamente o sistema real que foi modelado. Isso geralmente implica que o modelo também seja inequívoco, ou seja, não contenha ambiguidades. Infelizmente, essas suposições não são justificadas se for importante que o modelo descreva bem a realidade, que não é *crisp* (ZIMMERMANN, 2010).

Por muito tempo, a teoria da probabilidade e a estatística têm sido as teorias e ferramentas predominantes para modelar as incertezas da realidade (LODWICK; JAMISON, 2006; ZADEH, 2005). Elas são baseadas - como todas as teorias formais - em certas suposições axiomáticas[20], que quase nunca são testadas, quando essas teorias são aplicadas à realidade (ZIMMERMANN, 2010).

Uma abordagem alternativa para lidar com esta temática é a teoria dos conjuntos difusos (*fuzzy* em inglês), uma generalização da teoria dos conjuntos clássicos, introduzida no trabalho de (ZADEH, 1965) como uma ferramenta matemática para lidar com incertezas.

---

[19] "*Crisp*" indica que as ferramentas tradicionais de modelagem formal, raciocínio e computação operam de forma binária, dividindo as informações em duas categorias distintas, sem levar em conta nuances ou ambiguidades.

[20] Suposições axiomáticas são as bases sobre as quais as teorias formais são construídas e não são geralmente testadas, mas são aceitas como verdadeiras dentro do contexto da teoria em questão. Em outras palavras, são princípios inquestionáveis que servem como ponto de partida para o desenvolvimento de uma teoria ou sistema formal.

A teoria dos conjuntos difusos destaca uma estrutura matemática rigorosa na qual fenômenos conceituais vagos podem ser estudados com precisão e rigor. Também pode ser considerada como uma linguagem de modelagem, adequada para situações em que existem relações, critérios e fenômenos difusos. A aceitação dessa teoria cresceu lentamente nas décadas de 1960 e 1970, no entanto em 2000 havia mais de 30000 publicações a respeito do tema. Umas das linhas em que a teoria se desenvolveu é como ferramenta de modelagem, resolução de problemas e mineração de dados, mostrando-se superior aos métodos existentes em muitos casos (ZIMMERMANN, 2010).

Segundo (SIVANANDAM; SUMATHI; DEEPA, 2007), a linguagem natural usada pelos seres humanos para descrever e compartilhar o conhecimento está sujeita a incertezas, apesar da capacidade de nos comunicarmos com precisão em grau aceitável, mas geralmente ser difícil concordar com precisão entre nós sobre uma palavra ou termos de senso comum. Por exemplo, os conceitos como “muitos”, “altos”, “muito maior que”, “jovens”, entre outros, apresentam uma linha tênue entre verdadeiro e falso. Tais conceitos podem ser nomeados como difusos.

Os conjuntos da teoria clássica são denominados *crisp*, de modo que um elemento do domínio pertence ou não pertence a um determinado conjunto. Na teoria dos conjuntos difusos há um grau de pertinência para cada elemento em relação a um conjunto específico.

Note que no conjunto a seguir não há um limite bem definido para indicar o pertencimento de um elemento a este conjunto, se empregarmos a teoria clássica:

- Conjunto R: pessoas idosas

No entanto, nos conjuntos difusos podem ser definidos critérios e graus de pertinência para o caso apresentado acima.

Desta maneira, temos a seguinte definição de conjunto difuso apresentada no trabalho de (DERNONCOURT, 2013) e destacada na Tabela 1. Os valores reais entre o intervalo $[0,1]$ indicam o grau de pertinência dos elementos do conjunto X em relação ao conjunto R.

Tabela 1 - Definição de conjunto difuso.

Seja X um conjunto universo. Um subconjunto difuso R de X é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_R: X \rightarrow [0,1]$[21]

Fonte: Adaptado de (DERNONCOURT, 2013).

Retomando o exemplo dos idosos, considera-se o conjunto R como difuso. O conjunto universo é representado pela Equação (1), e a função de pertinência para pessoas idosas no universo do conjunto X é dado pela Equação (2). Note a transição gradual da função de pertencimento entre o intervalo [0,1]; quanto maior o valor do elemento pertencente ao conjunto universo, maior é o seu pertencimento ao conjunto R.

$$X = \{2, 17, 42, 74\} \tag{1}$$

$$\begin{Bmatrix} \mu_R(2) = 0 \\ \mu_R(17) = 0.1 \\ \mu_R(42) = 0.6 \\ \mu_R(74) = 1 \end{Bmatrix} \tag{2}$$

As funções de pertencimento podem ter formatos distintos, como triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoide, hiperbólica, entre outras, desde que mapeiem os dados fornecidos com o grau de associação desejável. Elas são definidas por estudos estatísticos ou seguindo conselho de especialistas, que com sua experiência direcionam a forma da função que mais se adequa à aplicação em questão (SADOLLAH, 2018).

[21] Na teoria, é possível que a saída seja maior que 1, mas é uma prática comum adotar o intervalo [0,1].

2.3.2 **Variáveis linguísticas**

Se uma variável pode assumir palavras em linguagem natural como seus valores, ela é chamada de variável linguística, sendo que as palavras são caracterizadas por conjuntos *fuzzy* definidos no universo de discurso em que a variável é definida.

O exemplo a seguir, adaptado do trabalho de (WANG, 1996), contribui para o entendimento do termo. Considere a velocidade do carro como a variável S que assume valores numéricos no intervalo [0, V_{MAX}], em que V_{MAX} é a velocidade máxima do carro. São definidos três conjuntos *fuzzy* sobre o intervalo descrito, sendo eles: devagar, moderado e rápido. Ao assumir que S é uma variável linguística, então "devagar", "moderado" e "rápido" são valores de S, i.e, pode-se dizer que S é devagar, moderado ou rápido. No entanto, S também pode assumir valores numéricos no intervalo [0, V_{MAX}], por exemplo, S = 65 km/h.

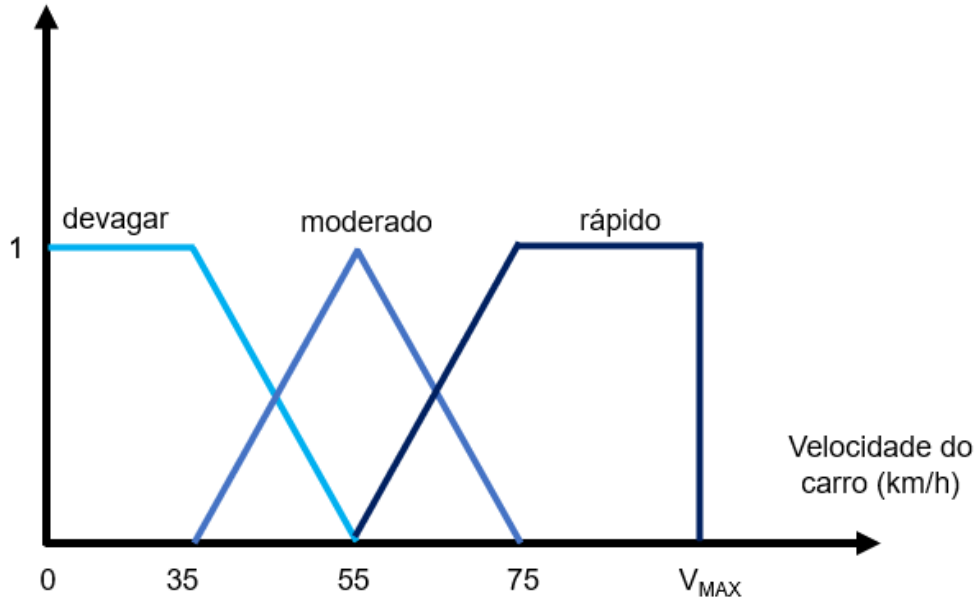
A definição formal de variáveis linguísticas, apresentada no trabalho de (ZADEH, 1975) é destacada na Tabela 2.

Tabela 2 - Definição de variável linguística.

A variável linguística é caracterizada por (S, T, U, M), onde:
• S é um nome da variável linguística. No exemplo do carro, S é a velocidade do carro.
• T é um conjunto de valores linguísticos que S pode assumir. No exemplo do carro, T = {devagar, moderado, rápido}.
• U é o domínio em que a variável linguística S assume valores quantitativos (c*risp*). No exemplo do carro, $U = [0, V_{MAX}]$.
• M é a regra semântica que relaciona cada valor linguístico em T com um conjunto *fuzzy* em U. No exemplo do carro, M relaciona "devagar", "moderado" e "rápido" com as funções de pertencimento da Figura 10.

Fonte: Adaptado de (WANG, 1996).

Figura 10 - A velocidade do carro é uma variável linguística associada às funções de pertencimento dos conjuntos difusos “devagar”, “moderado” e “rápido”.



Fonte: Autor (2022).

2.3.3 **Regras IF-THEN**

As variáveis linguísticas são os elementos fundamentais para a representação do conhecimento humano. Quando sensores são usados para medir uma variável, eles fornecem números, porém quando especialistas a avaliam, eles fornecem palavras. Por exemplo, um sensor de temperatura apresenta valores numéricos em sua saída e os especialistas a descrevem como temperatura baixa, média ou alta. Esse conceito é importante para incorporar o conhecimento humano em sistemas de engenharia de uma maneira eficiente (WANG, 1996).

Em sistemas difusos, o conhecimento humano é representado em termos de regras IF-THEN, cuja sentença padrão é representada na Tabela 3, onde PD é a contração de “proposição difusa”.

Tabela 3 - Representação global de uma regra difusa.

$\text{IF} < \text{PD } 1 > \text{THEN} < \text{PD } 2 >$

Fonte: Autor (2022).

2.3.3.1 Proposições difusas

As proposições difusas são divididas em dois tipos: em uma proposição difusa atômica há apenas uma variável linguística e um valor linguístico que é o conjunto difuso definido no conjunto universo, como mostrado nas duas primeiras linhas da Tabela 4. A velocidade e a aceleração do carro são as variáveis linguísticas que podem assumir os valores linguísticos “nula” e “maior que zero”, respectivamente. As linhas três e quatro destacam exemplos de proposições compostas, que usam os conectivos “e”, “ou” e “não” para representar a interseção, união e complemento, das proposições difusas, respectivamente.

Tabela 4 - Tipos de proposições difusas.

A velocidade do carro é nula
A aceleração do carro é maior que zero
A velocidade do carro é nula e a aceleração do carro não é maior que zero
A velocidade do carro é nula ou a aceleração do carro é maior que zero

Fonte: Autor (2022).

As proposições compostas são denominadas relações difusas e pode-se interpretar as regras *fuzzy* substituindo os operadores “e”, “ou” e “não” por operadores difusos.

2.3.4 **Operadores de conjuntos difusos**

As operações entre conjuntos difusos são realizadas por meio de operadores que atuam sobre as funções de pertinência. Há uma variedade de interpretações de operadores difusos de união, intercessão e complemento que podem ser empregados para uma regra difusa IF-THEN. O detalhamento das interpretações de Dienes-Rescher, Lukasiewicz e Mamdani é abordado no trabalho de (WANG, 1996). Os operadores destacados por Zadeh (ZADEH, 1965) são denominados como operadores difusos padrão (KLIR; YUAN, 1995) e são amplamente usados em sistemas especialistas (DERNONCOURT, 2013), e por isso, são detalhados a seguir.

Assumindo que P e B são conjuntos difusos definidos no conjunto universo U, as principais operações de conjuntos difusos são apresentadas a seguir com base nos trabalhos de (KLIR; YUAN, 1995; ROSS, 2010; WANG, 1996).

Como aponta a Equação (3) a operação difusa de igualdade entre os conjuntos P e B só é satisfeita se, para todos os elementos do conjunto universo U, as funções de pertencimento aos conjuntos P e B, i.e, $\mu_P(x)$ e $\mu_B(x)$, respectivamente, são iguais. Ao retomar o exemplo do carro da seção 2.3.2, a Equação (4) destaca que para quando x assume o valor de 55 km/h, os graus de pertencimento aos conjuntos “devagar”, “moderado” e “rápido” são distintos. A Figura 10 deixa aparente que para nenhum valor assumido por x, há um ponto em que as três funções de pertinência assumem o mesmo grau de pertinência, nesse exemplo.

$$Igualdade \qquad \mu_P(x) = \mu_B(x) \ \forall x \in U \tag{3}$$

$$\begin{Bmatrix} U = [0, V_{MAX}] \\ \mu_{devagar}(55) = 0 \\ \mu_{moderado}(55) = 1 \\ \mu_{rápido}(55) = 0 \end{Bmatrix} \tag{4}$$

A operação difusa de inclusão, retratada na Equação (5), destaca que o conjunto difuso P estar contido em B implica, necessariamente, que para todos os elementos do conjunto universo U, o grau de pertencimento desses elementos ao conjunto P seja menor que o grau de pertencimento ao conjunto B. Com essa definição, é observado na Figura 10 que nenhum dos conjuntos, i.e, “devagar”, “moderado” e “rápido” estão inclusos entre si.

$$Inclusão \qquad P \subset B \Rightarrow \mu_P(x) < \mu_B(x) \ \forall x \in U \tag{5}$$

O complemento de P é o conjunto difuso $\bar{P}$ contido em U, cuja função de pertinência é apresentada na Equação (6).

$$Complemento \qquad \mu_{\bar{P}}(x) = 1 - \mu_P(x) \tag{6}$$

A união de P e B é o conjunto difuso contido em U, definido por $P \cup B$, cuja função de pertinência é definida pela Equação (7). A união de P e B é o menor conjunto *fuzzy* contendo ambos os conjuntos. Essa afirmação é explicada intuitivamente a seguir: $P \cup B$ é definido conforme a Equação (7), pois, para determinado elemento x definido no conjunto universo U, o valor máximo entre as duas funções de pertinência $\mu_P(x)$ e $\mu_B(x)$, i.e, $\max[\mu_P(x), \mu_B(x)]$, é, necessariamente, maior ou igual a $\mu_P(x)$ e $\mu_B(x)$, conforme destacado na Equação (8). Se C é qualquer conjunto difuso que contém P e B, então $\mu_C(x)$ é maior ou igual que $\mu_P(x)$ e $\mu_B(x)$, como mostra a Equação (9). Logo, a Equação (10) salienta que $\mu_C(x)$ é maior ou igual a $\max[\mu_P(x), \mu_B(x)]$, sinalizando que $P \cup B$ definido pela Equação (7) é o menor conjunto *fuzzy* contendo ambos os conjuntos.

$$União \qquad \mu_{P \cup B}(x) = \max[\mu_P(x), \mu_B(x)] \tag{7}$$

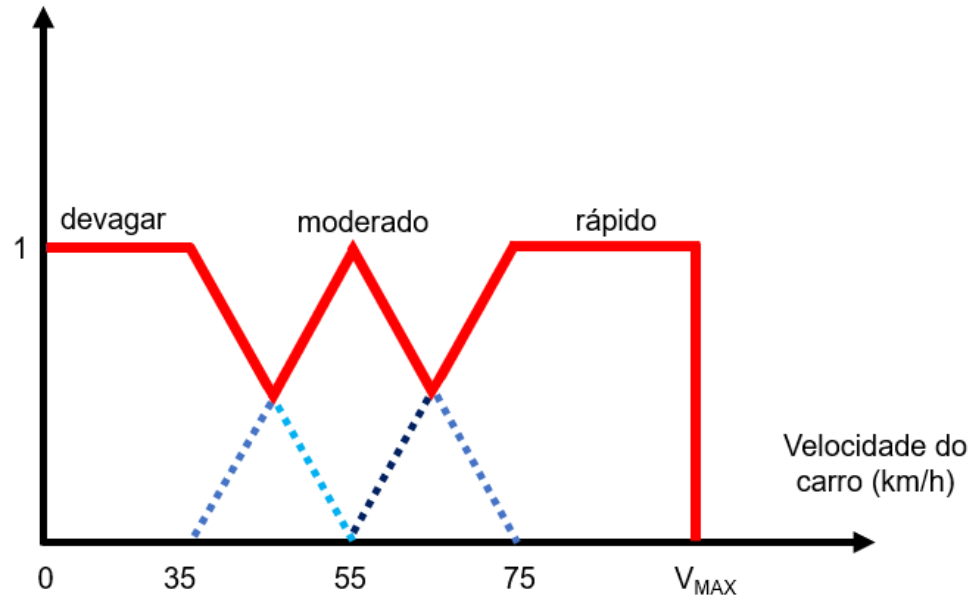
$$\left.\begin{matrix} \max[\mu_P(x), \mu_B(x)] \ \geq \ \mu_P(x) \\ \max[\mu_P(x), \mu_B(x)] \ \geq \ \mu_B(x) \end{matrix}\right\} \tag{8}$$

$$\left.\begin{matrix} \mu_C(x) \ \geq \ \mu_P(x) \\ \mu_C(x) \ \geq \ \mu_B(x) \end{matrix}\right\} \tag{9}$$

$$\mu_C(x) \ \geq \ \max[\mu_P(x), \mu_B(x)] = \ \mu_{P \cup B}(x) \tag{10}$$

A união dos conjuntos apresentados na Figura 10, está destacada na Figura 11. A linha vermelha representa $\mu_{devagar \cup moderado \cup rápido}(x)$ para todo elemento x contido no intervalo $[0, \mathrm{V_{MAX}}]$.

Figura 11 - Representação da função de pertinência para a união dos conjuntos difusos “moderado”, “rápido” e “devagar”.



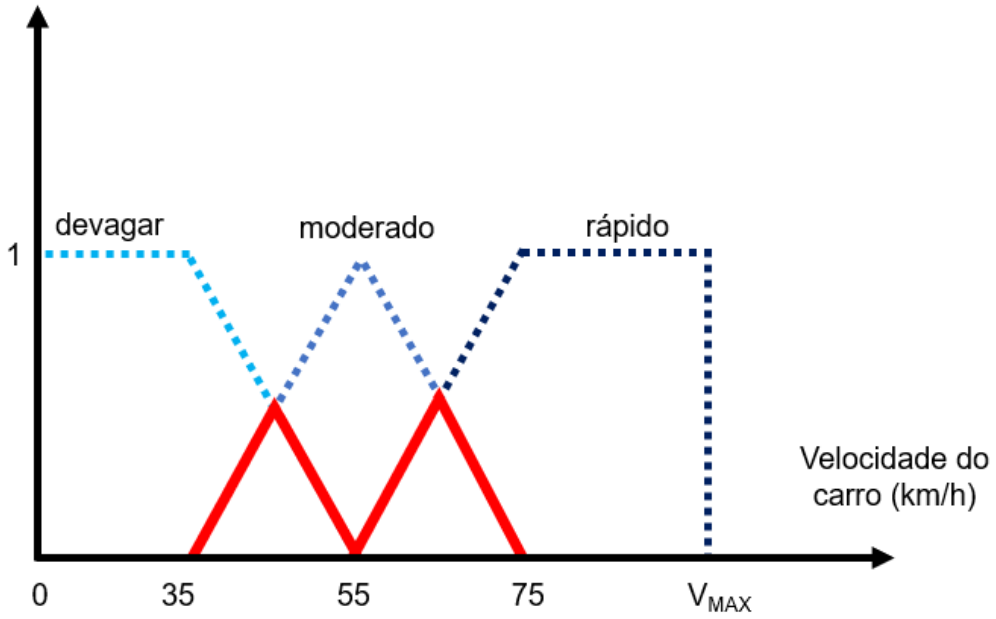
Fonte: Autor (2022).

A representação da função de pertinência da intercessão dos conjuntos difusos P e B é destacada na Equação (11), cuja justificativa pode ser retratada de maneira similar à operação de união. A intercessão de P e B é representada pelo conjunto de elementos x que, simultaneamente, pertencem a ambos os conjuntos.

A intercessão dos conjuntos apresentados na Figura 10, está destacada na Figura 12. A linha vermelha representa $\mu_{devagar \cap moderado \cap rápido}(x)$ para todo elemento x contido no intervalo $[0, \mathrm{V_{MAX}}]$.

$$Intercessão \qquad \mu_{P \cap B}(x) = \min[\mu_P(x), \mu_B(x)] \qquad (11)$$

Figura 12 - Representação da função de pertinência para a intercessão dos conjuntos difusos “moderado”, “rápido” e “devagar”.

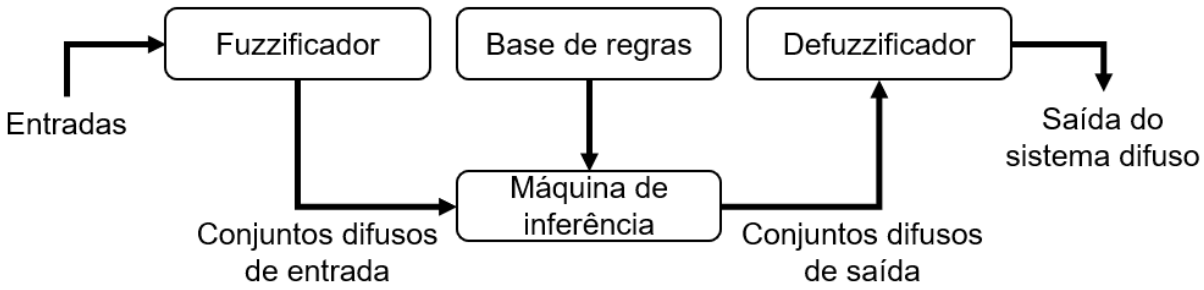


Fonte: Autor (2022).

2.3.5 **Arquitetura da lógica difusa**

A arquitetura de um sistema baseado em lógica difusa é representada pela Figura 13 , cuja etapas são introduzidas abaixo, seguindo a abordagem dos trabalhos de (SIMÕES; SHAW, 1999; SIVANANDAM; SUMATHI; DEEPA, 2007; WANG, 1996).

Figura 13 - Arquitetura da lógica difusa



Fonte: Autor (2022).

- Base de regras: O sistema baseado em regras difusas é composto por proposições difusas do tipo apresentado na Tabela 3. As regras são formadas de acordo com o conhecimento dos especialistas. Nesta etapa, as variáveis linguísticas são representadas por conjuntos difusos.

- Fuzzificador: A fuzzificação é o processo em que as entradas de números reais, i.e, *crisp*, são convertidas em número do domínio difuso. A conversão é representada pelos conjuntos difusos definidos no intervalo [0,1] e está associada as funções de pertinência e variáveis linguísticas definidas para o sistema difuso.

- Máquina de inferência (MI): Em uma máquina de inferência nebulosa, princípios lógicos são usados para combinar as regras nebulosas IF-THEN que compõem a base de regras, formando um mapeamento de um conjunto nebuloso de entrada (antecedente) em um conjunto nebuloso de saída (consequente).

- Defuzzificador: A defuzzificação compreende o mapeamento da saída difusa da máquina de inferência em valores numéricos. O conjunto difuso de saída gerado pela MI não pode ser utilizado em sistemas aplicados à engenharia, portanto é necessário convertê-lo em um único valor *crisp*. Desta forma, a defuzzificação é uma transformação que traduz a saída do domínio difuso para o domínio discreto ou real. Há métodos apropriados para o processo de defuzzificação e entre eles o que se destaca é o Centro Médio por sua simplicidade computacional e por ser um método contínuo, logo pequenas mudanças na entrada não geram mudanças bruscas na saída do sistema. O método do Centro Médio aproxima o centro de gravidade y^* como sendo a soma ponderada dos pontos médios y_k de cada conjunto nebuloso (M) de saída cujos pesos w_k são dados pelos valores das funções de pertinência naqueles pontos. O valor de y^* é definido na Equação (12).

$$y^* = \frac{\sum_{k=1}^{M} y_k w_k}{\sum_{k=1}^{M} w_k} \tag{12}$$

3 DESENVOLVIMENTO DA TAMPA INTELIGENTE

Neste capítulo são abordados os elementos constituintes da tampa inteligente, os testes individuais com os sensores embarcados, e testes com o sistema da tampa integrado. É enfatizado também a estrutura do sistema especialista que infere sobre os riscos potenciais na formação do eletrodo Søderberg.

3.1 ESTRUTURA DA TAMPA INTELIGENTE

O dispositivo que constitui a tampa inteligente está sob processo de patenteamento (ainda não depositado), e sob orientação dos órgãos envolvidos neste processo, a estrutura da tampa será apresentada sem destacar aspectos técnicos expressivos, como o modelo dos sensores utilizados. Entretanto, o leitor será direcionado para que o propósito da tampa seja compreendido a seguir.

A tampa inteligente é fabricada em aço carbono, projetada para que seja assentada sobre o topo da coluna de um eletrodo, a fim de realizar medidas dos níveis de pasta dentro da coluna e da temperatura da superfície da pasta. A Figura 14 abaixo mostra a visão externa do dispositivo.

Figura 14 - Vista externa da tampa inteligente.

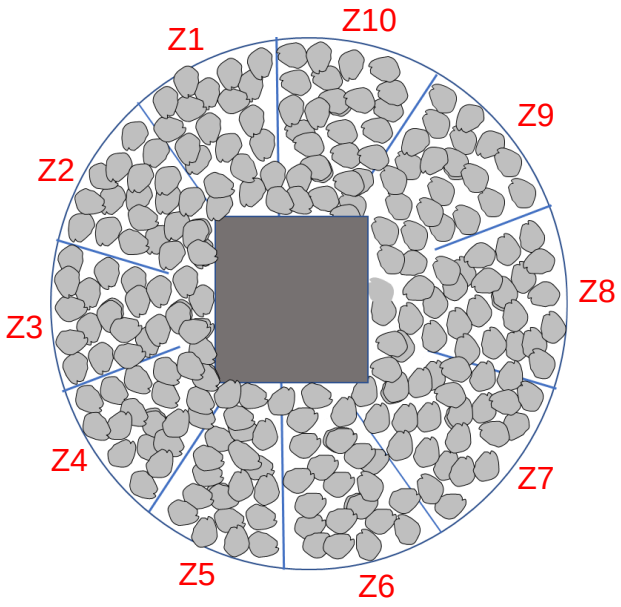
Fonte: Autor (2023).

Além dos sensores, a tampa possui um microcomputador que gerencia todas as medições e salva os dados em um banco de dados local. Soma-se a estes elementos, um modem 4G conectado ao microcomputador, que viabiliza o sincronismo do banco

de dados local com um banco de dados em um servidor, para acesso às informações coletadas. O modem também entrega à equipe do projeto a praticidade de realizar o acesso remoto para eventuais manutenções e atualizações do sistema.

A Figura 15 destaca uma ilustração do perfil de alimentação da superfície superior da pasta adicionada à coluna monitorada[22] pela tampa. Nela averígua-se que os espaços entre aletas são preenchidos com a pasta eletródica no formato de briquete, enquanto no centro é adicionado pasta em formato bloco. Ao todo são dez zonas entre aletas.

Figura 15 - Ilustração da vista superior do perfil de alimentação na coluna de eletrodo de teste da tampa.



Fonte: Autor (2022).

Por experiência dos operadores, sabe-se que os níveis de ambos os tipos de pasta no interior na coluna, variam de maneira não uniforme. Portanto, uma metodologia inovadora integrada ao projeto da tampa, consistiu em monitorar, em intervalos de tempo constantes, a variação do nível em cada uma das aletas, além do nível do bloco e o nível entre o topo da coluna e o anel de deslizamento, denominado nível externo.

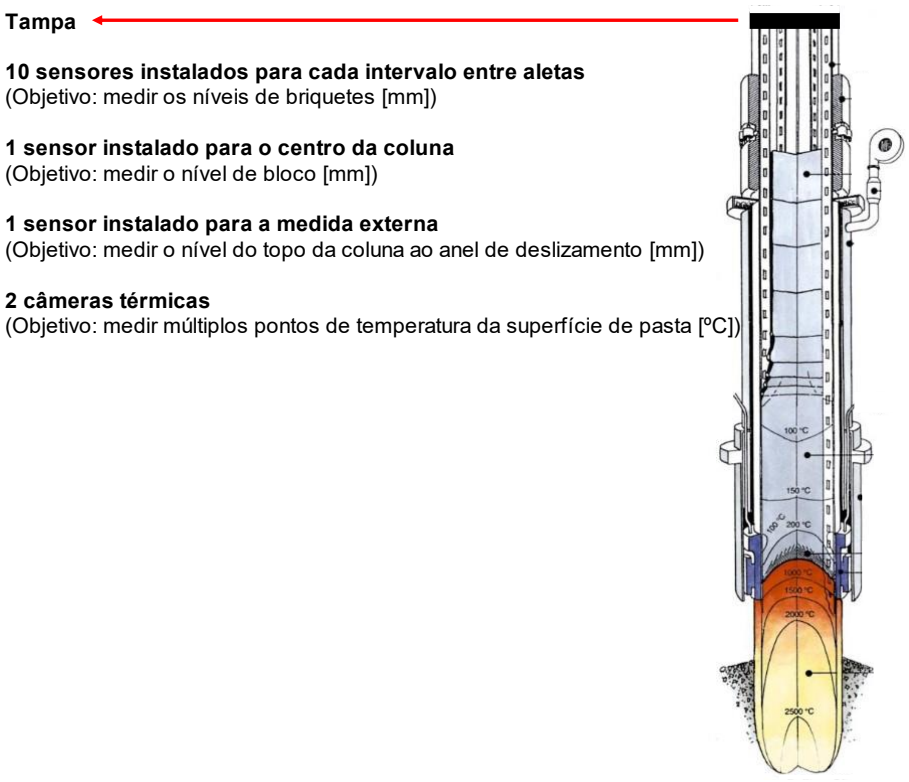
[22] Esse monitoramento foi realizado na companhia de ferroligas, que acolheu o teste da tampa em um de seus fornos. O perfil de alimentação é específico de cada companhia, baseado no seu sistema operação do forno e experiência do processo. A título de conhecimento, outro padrão comum de alimentação de pasta eletródica emprega somente briquetes.

Esta última medida é um indicador real de deslizamento do eletrodo e uma variável da expressão algébrica[23] que determina os níveis de pasta no interior da coluna.

Estas medidas serão relacionadas, via sistema especialista, com as condições de temperaturas vigentes na superfície da pasta em que a tampa está apoiada, i.e, no topo da coluna. Para isto, a tampa possui integrado duas minicâmeras térmicas, que monitoram a distribuição de temperatura da superfície da pasta eletródica.

A Figura 16 resume os sensores instalados na tampa e a finalidade deles, enquanto a Figura 17 destaca um diagrama simplificado do tráfego das medidas registradas até alcançar a etapa de processamento e análise remota.

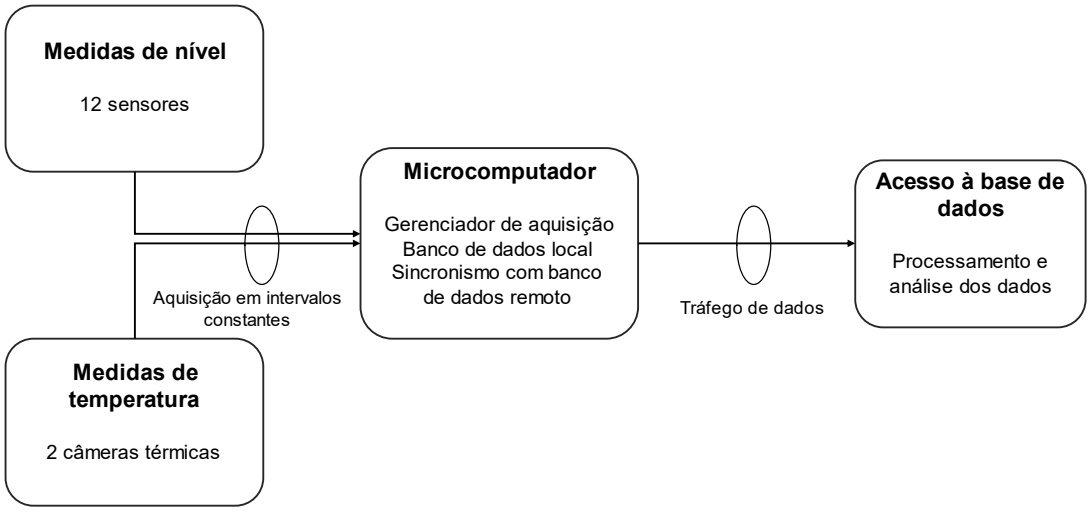
Figura 16 - Sensores instalados na tampa inteligente.



Fonte: Adaptado de (SKJELDESTAD *et al.*, 2015).

[23] Essa expressão é de uso interno da companhia de ferroligas, e mediante orientação, não será divulgada. É importante lembrar que os sensores de nível da tampa, realizam a medida do topo da coluna até a superfície, porém a medida desejada é o nível de pasta (briquetes e bloco). Com as medidas adquiridas pela tampa, e ao aplicá-las na equação algébrica, tem-se a medição indireta dos níveis de pasta.

Figura 17 - Diagrama simplificado do tráfego das medidas aquisitadas.



Fonte: Autor (2022).

3.2 TESTE DOS SENSORES

Como fase antecedente da instrumentação da tampa inteligente, foi realizada a especificação dos sensores para o monitoramento dos níveis da pasta e o perfil de temperatura da superfície da pasta. Todos os sensores foram especificados para operar conforme as condições operacionais de temperatura do piso em que é realizado a alimentação da pasta.

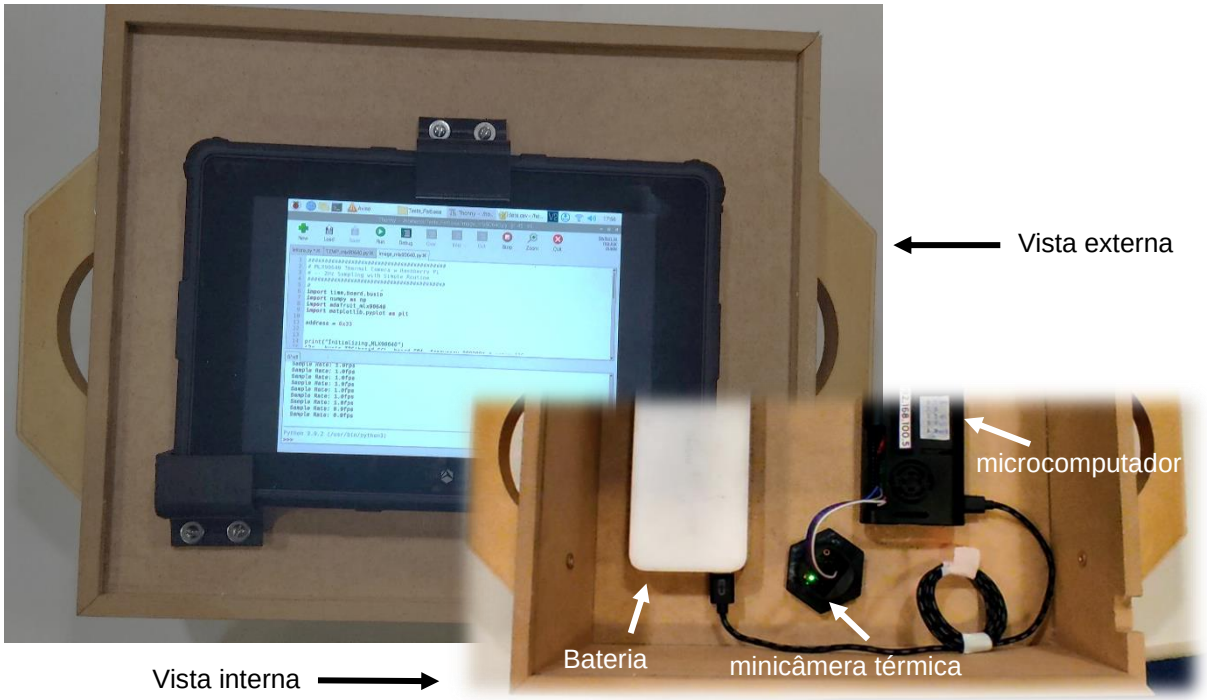
3.2.1 **Minicâmera térmica**

Com objetivo de certificar se o modelo da minicâmera térmica funcionaria sob as condições de operação do forno, foi realizado um teste local com uma unidade deste sensor, em múltiplos fornos da companhia de ferroligas. A decisão de não testar o sensor de nível derivou do fato que o princípio de medição deste sensor é o mesmo usado pelos operadores. Logo, não houve dúvidas sobre sua capacidade de realizar a medida. Os testes realizados com o modelo do sensor de nível foram executados em laboratório, conforme descrito na subseção 3.2.2.

Incialmente foi construída uma pequena caixa em MDF, com dimensões C: 32 cm X L: 27 cm X A: 11 cm para alocar em seu interior uma bateria, um microcomputador, e a câmera térmica. Ela foi estruturada com duas alças laterais, para que o usuário a posicionasse, manualmente, sobre o topo da coluna dos eletrodos.

Um *tablet* foi usado para conectar-se ao microcomputador utilizando o *Virtual Network Computing* (VNC) que é um sistema de compartilhamento gráfico de *desktop* e usa o protocolo *Remote Frame Buffer* para controlá-lo remotamente. O *tablet* foi fixado à tampa da caixa, como aponta a Figura 18, para prevenir quedas e facilitar a operação do usuário, que através deste dispositivo executava o comando para iniciar a aquisição e armazenamento dos dados de temperatura da minicâmera térmica.

Figura 18 - Disposição do *tablet* fixado à caixa de teste dos sensores e dos elementos embarcados na caixa.



Fonte: Autor (2022).

Os dados coletados[24] com a minicâmera térmica foram processados e gerou-se quatorze vídeos do perfil de temperatura da superfície da pasta, com duração aproximada de um minuto cada. Um exemplo de um dos vídeos pode ser averiguado no *link* a seguir: https://streamable.com/r1d14d.

A Figura 19 destaca quatro *frames* da imagem térmica da superfície da pasta em colunas de eletrodos sob fornos distintos, com 768 *FIR*[25] pixels, sendo que cada pixel

[24] Os testes ocorreram em cinco fornos distintos que operavam sob condições distintas.
[25] FIR é a sigla para *Far Infrared Radiation*, traduzido para o português como infravermelho vermelho longínquo. Trata-se da região no espectro infravermelho da radiação eletromagnética.

é atrelado a uma medida de temperatura. No *frame* A[26] é apresentado um *frame* retratando a superfície mais fria da superfície da pasta monitorada, com temperatura máxima de 60°C, aproximadamente. Nota-se que o centro da superfície, onde está localizado a pasta em formato bloco, apresentava temperatura mais baixa, sendo este um comportamento esperado, pois a camada de briquetes, em torno no bloco, normalmente está mais abaixo em relação ao topo da coluna. No *frame* B[27] está o registro da superfície da pasta de uma coluna que é alimentada somente com briquetes, e neste caso é previsto temperatura mais uniforme em relação ao *frame* A, porém com amplitudes mais elevadas. A temperatura máxima neste *frame* é próxima de 80°C. Os *frames* C[28] e D[29] também foram extraídos do monitoramento de colunas que são alimentadas somente com briquetes.

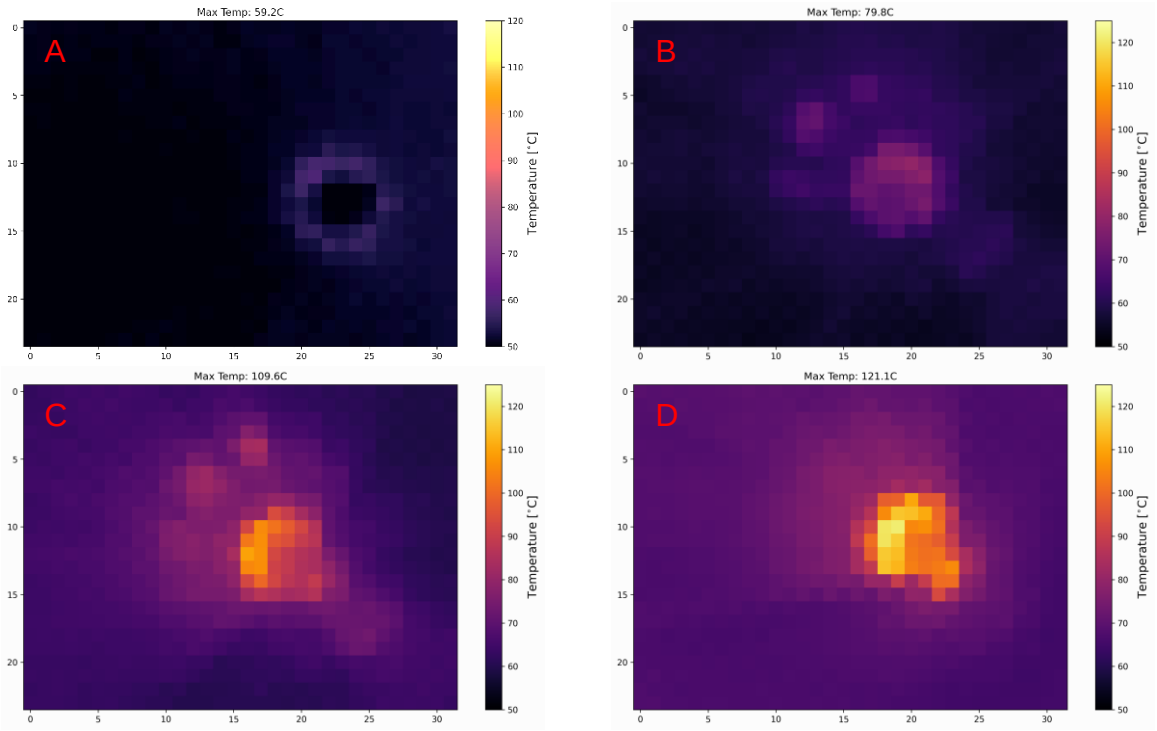
Dos dados analisados e vídeos gerados deduz-se que para o monitoramento da superfície da pasta, a relação entre a temperatura e o nível da superfície da pasta não é necessariamente linear. As condições de operação influenciam nas condições de temperaturas vigentes na coluna. Em um caso hipotético, em que dois fornos estão operando com o mesmo tipo de pasta e o nível de pasta de ambos é o mesmo, o perfil de temperatura da superfície da pasta será imposta pelos parâmetros de operação do forno.

Os dados aquisitados compilados nos vídeos foram apresentados aos supervisores do projeto, detentores do conhecimento do processo e estes validaram o resultado. Desta forma, foi certificado que o modelo da minicâmera térmica especificado atenderia a necessidade do projeto.

---

[26] A distância do topo da coluna até a superfície do bloco e de briquete era de 4,27m e 7,21m, respectivamente. O registro foi realizado pelo sensor usado pela equipe de operação do forno.
[27] A distância do topo da coluna até a superfície dos briquetes era de 9,40m.
[28] A distância do topo da coluna até a superfície dos briquetes era de 9,38m.
[29] A distância do topo da coluna até a superfície dos briquetes era de 7,44m.

Figura 19 - *Frames* da imagem térmica da superfície da pasta em colunas de eletrodos distintos.

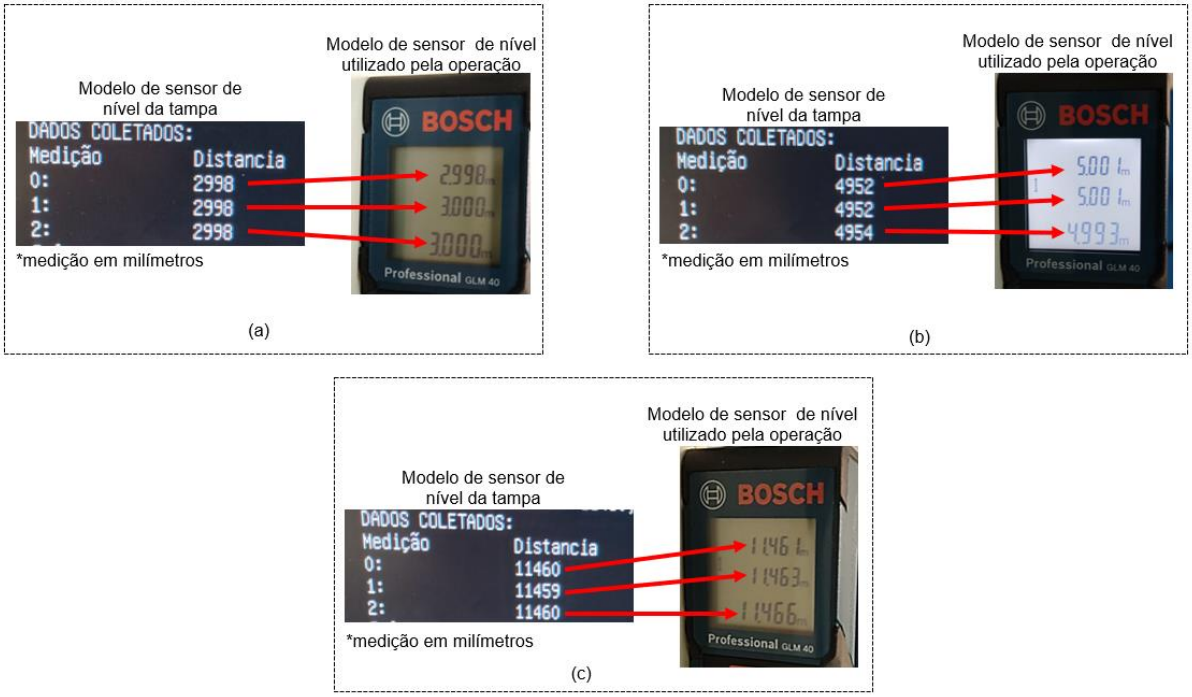


Fonte: Autor (2023).

3.2.2 **Sensor de nível**

Em sua especificação, o modelo do sensor de nível apresenta acurácia de ±1 mm e *range* de medição entre 0.03 e 40m. A equipe do projeto focou os testes aferindo a capacidade do sensor em realizar medidas com amplitudes similares às encontradas nas colunas dos eletrodos, i.e, entre 3m e 11m, aproximadamente. Com os testes realizados, a performance das medições dos sensores de nível foi comparada com um modelo de sensor igual ao utilizado pelos operadores da companhia de ferroligas e os resultados foram convergentes, como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Validação da medição do sensor de nível.



Fonte: Autor (2022).

3.3 TESTES *IN LOCO* COM A TAMPA INTELIGENTE

Após a conclusão da etapa de montagem, instrumentação, desenvolvimento de código e testes em laboratório, a tampa inteligente foi deslocada para as dependências da companhia produtora de ferroligas, com fim de avaliar seu desempenho em ambiente operacional.

No teste primário, o acompanhamento da performance da tampa em estado de funcionamento se estendeu por quatro dias, e inconformidades foram identificadas, como será relatado a seguir. Inicialmente foi identificado que o modem não se conectava com a rede 4G. A solução de contorno empregada para sanar o problema compreendeu em fixar o modem na parte externa da tampa, conectado ao microcomputador por meio de um cabo extensor USB blindado para prevenir interferências eletromagnéticas provenientes dos processos do SAFs.

Outro contratempo, identificado somente em ambiente operacional, diz respeito ao desalinhamento de alguns sensores de nível (briquetes e bloco). As medições realizadas por estes sensores apresentavam valores menores que os reais, i.e, eles

não estavam alinhados corretamente. Com o auxílio da equipe operacional, o alinhamento foi realizado e a constatação visual do feixe dos lasers era o indicativo para definir o posicionamento ideal.

Além dos desafios mencionados, foi necessário substituir um sensor de nível devido a danos ocorridos durante o manuseio da tampa, além de realizar ajustes na instalação do sensor no bloco. Todas essas tarefas consumiram considerável tempo e esforço da equipe responsável pelos testes da tampa, impactando negativamente o cronograma previsto para a execução dos testes primários de medição de nível e temperatura.

Entretanto, mesmo com esses acontecimentos indesejados, foi constatado que as poucas medidas pontuais de nível (briquete e bloco) foram armazenadas no banco de dados local e remoto (servidor) como aponta a amostra da Tabela 5. A constatação deste ponto foi fundamental para atestar a viabilidade de interpretação e avaliação remota dos dados aquisitados. Infelizmente, os dados de temperatura das duas minicâmeras térmicas não foram armazenados devido a um problema de inicialização destes sensores no código desenvolvido.

Tabela 5 - Amostra de dados de nível coletados pela tampa inteligente – teste primário.

ID do sensor	Timestamp	Medições
Sensor de nível – Aleta 1	15/09/2022 18:01	8905 mm
Sensor de nível – Aleta 2	15/09/2022 18:01	9058 mm
Sensor de nível – Aleta 3	15/09/2022 18:01	8899 mm
Sensor de nível – Aleta 4	15/09/2022 18:01	8796 mm
Sensor de nível – Aleta 5	15/09/2022 18:01	8898 mm
Sensor de nível – Aleta 6	15/09/2022 18:01	8622 mm
Sensor de nível – Aleta 7	15/09/2022 18:01	7771 mm
Sensor de nível – Aleta 8	15/09/2022 18:01	6127 mm
Sensor de nível – Aleta 9	15/09/2022 18:01	8009 mm
Sensor de nível – Aleta 10	15/09/2022 18:01	8567 mm
Sensor de nível – Bloco	15/09/2022 18:01	6009 mm
Sensor de nível – Externo	15/09/2022 18:01	7361 mm

Fonte: Autor (2022).

O teste *in loco* realizado no mês de setembro de 2022 foi relevante para que os pontos de melhoria da tampa inteligente fossem levantados. Posto isso, adaptações

mecânicas, de instrumentação e *software* foram implementadas para que em uma fase posterior dos testes em campo, todo o sistema operasse conforme esperado.

Após aplicar os devidos reparos na tampa, novas rodadas de testes foram realizadas em 2023. A Tabela 6 destaca uma amostra das medidas dos 12 sensores de níveis. Segundo informações da operação da companhia que aderiu o uso da tampa, as medidas entre aletas podem diferir em ±1 m entre si, aproximadamente, devido a distribuição de nível não uniforme da camada de briquetes, como relatado na seção 2.1.1. Entretanto, ao analisar a medida retornada pelo sensor da aleta 4, nota-se uma diferença considerável em relação às demais. A principal hipótese deste diferencial é sustentada pelo fato de que ao alimentar a coluna com blocos, dependendo da maneira que são posicionados, eles podem se deslocar levemente para dentro de uma ou mais aletas e acabar mascarando as medidas de briquetes, de modo que o valor retornado seja menor, pois a coluna de blocos é comumente maior. Esta inconformidade é um dos temas levantados para trabalhos futuros que podem contorná-la, detalhado na seção 5.

Tabela 6 - Amostra de dados de nível coletados pela tampa inteligente – teste secundário.

ID do sensor	Timestamp	Medições
Sensor de nível – Aleta 1	21/09/2023 13:59	8153 mm
Sensor de nível – Aleta 2	21/09/2023 13:59	8293 mm
Sensor de nível – Aleta 3	21/09/2023 13:59	8372 mm
Sensor de nível – Aleta 4	21/09/2023 13:59	6436 mm
Sensor de nível – Aleta 5	21/09/2023 13:59	7344 mm
Sensor de nível – Aleta 6	21/09/2023 13:59	7268 mm
Sensor de nível – Aleta 7	21/09/2023 13:59	7510 mm
Sensor de nível – Aleta 8	21/09/2023 13:59	7095 mm
Sensor de nível – Aleta 9	21/09/2023 13:59	7600 mm
Sensor de nível – Aleta 10	21/09/2023 13:59	8010 mm
Sensor de nível – Bloco	21/09/2023 13:59	4570 mm
Sensor de nível – Externo	21/09/2023 13:59	6141 mm

Fonte: Autor (2022).

Nesta fase do teste, também foram capturadas imagens térmicas da superfície de briquetes e bloco.

A

Figura 21 (a), destaca o *frame* da distribuição térmica da minicâmera 1, enquanto o *frame* da

Figura 21 (b), representa a distribuição térmica da minicâmera 2. Note que foi delimitada uma região de interesse definida pela *bounding box* na cor branca, cuja posição é fixa para cada um dos *frames* gerados pelas minicâmeras. Isto é possível, pois independente do forno ou coluna em que a tampa será apoiada, os operadores foram instruídos a posicioná-la seguindo um referencial padrão[30]. A determinação da região de interesse é um requisito essencial, uma vez que, devido à abertura da minicâmera do modelo em uso, uma considerável quantidade de informações de temperatura precisa ser excluída no momento de entrada no sistema especialista. Portanto, somente os dados relativos à superfície da pasta devem ser considerados para a fase que antecede o tratamento dos dados de temperatura.

A análise visual de ambos os *frames*, indica que a temperatura na região do bloco (parte central da *bounding box*) tende a ser mais fria, pois a coluna de bloco é mais alta em relação à superfície de briquetes.

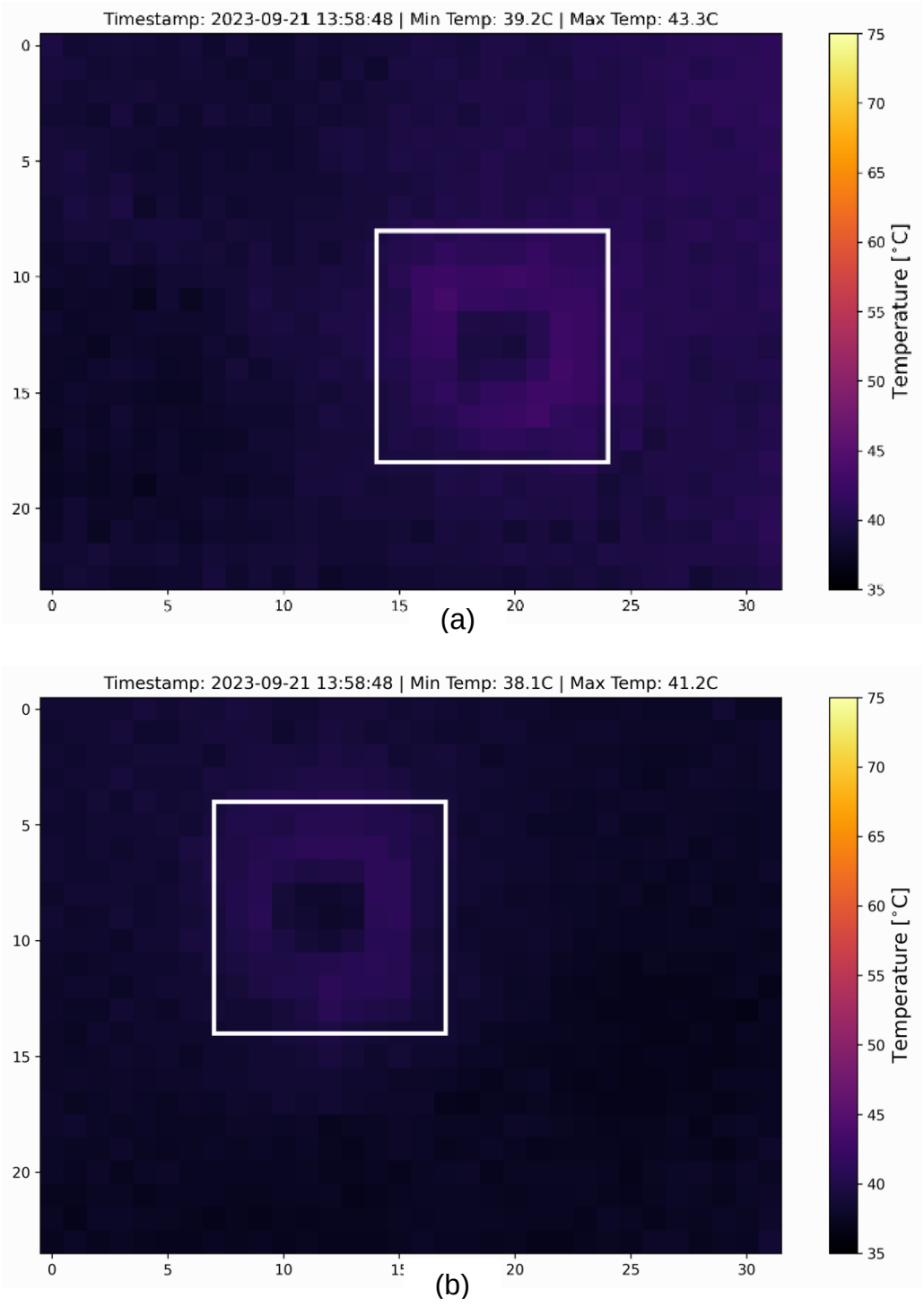
A minicâmera 1 registrou temperatura mínima de 39 °C e temperatura máxima de 43,3 °C. Por outro lado, a minicâmera 2 apresentou valores ligeiramente mais baixos, com 38,1 °C como temperatura mínima e 41,2 °C como temperatura máxima para os mesmos parâmetros. A diferença é aceitável, visto a acurácia do sensor ser de ±1 °C, aproximadamente.

Em uma abordagem qualitativa, é fundamental considerar que a temperatura não deve ser analisada isoladamente, mas sim em conjunto com o nível da superfície da pasta, a fim de estabelecer correlações entre esses elementos na análise dos parâmetros do processo dos fornos. No entanto, é importante ressaltar que o aprofundamento nesse tópico não faz parte do escopo deste trabalho, uma vez que envolveria a exposição de regras de operação e condições de processo de uso exclusivo interno da companhia. A única exceção quanto a avaliação isolada desta variável é a análise da

[30] Este é um referencial mecânico de posicionamento, garantindo que o sensor de nível externo esteja sempre perfeitamente alinhado com ele.

segregação, que está diretamente associada à temperatura da pasta líquida, a qual se mantém em torno de 110 °C.

Figura 21 - Amostra de dados de temperatura coletados pela tampa inteligente – teste secundário.



Fonte: Autor (2023).

3.4 ESTRUTURA DO SISTEMA ESPECIALISTA

Esta seção destaca a estrutura do sistema especialista baseado em lógica difusa, desenvolvido para inferir sobre a ocorrência dos três riscos potenciais na formação do eletrodo Søderberg, discutidos na seção 2.2.

Inicialmente serão apresentadas as variáveis de entrada e saída do sistema difuso, conforme destaca a Tabela 7.

Tabela 7 - Variáveis de entrada/saída e suas características.

Variável	Função	Range	Variáveis linguísticas	Descrição
IN-1 nível de briquetes	Entrada	[0, 10000] mm	baixo, operacional, alto	Níveis de briquete entre as aletas
IN-2 nível de bloco	Entrada	[0, 8000] mm	baixo, operacional, alto	Nível do bloco medido pelo sensor de bloco
IN-3 temperatura da pasta	Entrada	[0, 200] °C	baixa, operacional, alta	Temperatura da superfície da pasta medida
IN-4 variação do nível de briquete	Entrada	[0, 2000] mm	baixa, alta	Variação do nível de briquete entre aletas
OUT-1 simetria de pasta	Saída	[0,1]	alarme3[31], alarme2, alarme1, alarme0	Indicador de desnivelamento de briquetes entre as aletas
OUT-2 segregação de pasta	Saída	[0,1]	alarme0, alarme1[31]	Indicador de segregação
OUT-3 engaiolamento de pasta	Saída	[0,1]	alarme0, alarme1[31]	Indicador de engaiolamento

Fonte: Autor (2022).

As quatro variáveis de entrada do sistema são definidas de acordo com o sensoriamento realizado pela tampa inteligente. Os dados pré-processados dos dez sensores que monitoram os níveis de briquetes (IN-1), o sensor de nível do bloco central (IN-2), as matrizes de temperatura de ambas as minicâmeras térmicas (IN-3)

[31] Alarme crítico.

e as variações do nível de briquetes (IN-4), compõem a etapa de aquisição do bloco de entradas do sistema.

As três variáveis de saída (OUT-1, OUT-2 e OUT-3) são indicadores que geram níveis de alertas distintos, conforme os dados sugeridos na entrada. Desta forma, o operador treinado quanto ao significado de cada alarme, saberá quais medidas tomar em ocasiões conforme o resultado da inferência. As variáveis de saída serão exploradas na subseção 3.4.2.

O conteúdo das colunas “Range” e “Variáveis Linguísticas” da Tabela 7 serão detalhadas na subseção 3.4.2 que destaca as funções de pertinência dos conjuntos de entradas e saídas do SE.

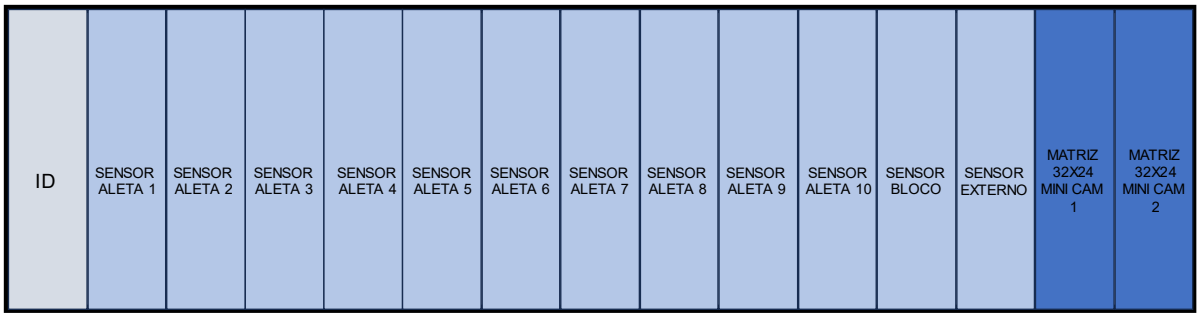
Inicialmente, para garantir a representatividade dos dados e robustez do sistema, deve-se tratar as possíveis inconformidades no processo de aquisição, como valores nulos. O tratamento destes dados é realizado, conforme destaca a subseção 3.4.1, a seguir.

3.4.1 **Tratamento dos dados de entrada**

As medições de nível e temperatura são obtidas ao ativar os doze sensores de nível seguidos pela ativação das duas minicâmeras térmicas. Esse conjunto de medições compõe a estrutura que será denominada "*struct*[32] de dados", representada pela Figura 22, que é armazenada em uma tabela de um banco de dados local no microcomputador a cada 15 minutos[33]. Para toda *struct* de dados é atribuído um identificador ID que é utilizado para rastrear e acessar as informações coletadas.

[32] Uma "struct" é uma estrutura de dados em programação que permite agrupar variáveis de diferentes tipos em um único objeto.
[33] Ressalta-se que este banco de dados é sincronizado com um banco de dados em um servidor, para acesso às informações coletadas como retratado na seção 3.1.

Figura 22 - Representação do *struct* de dados.



Fonte: Autor (2023).

Tratamento de IN-1, IN-2 e IN-4: A Figura 23 destaca o diagrama das etapas de tratamento das variáveis de entrada IN-1, IN2, e IN-4, discutidas a seguir.

(a) Na primeira etapa de processamento, as doze medições de nível de pasta de cada *struct* passam por uma verificação com o objetivo de identificar a presença de dados nulos ou inválidos. Quando o usuário fornece o ID[34] do *struct* inicia-se a consulta à tabela para recuperar as medidas de nível no momento t e no momento t-15, ou seja, as medições realizadas nos 15 minutos que precedem o instante t. Logo são retornados dois vetores, com 12 elementos cada. No caso em que algum dos vetores contenha dado(s) nulo(s) ou inválidos, é realizada nova consulta automática com o ID reduzido em uma unidade, e o processo se repete. Este método é viável, uma vez que assegura que todas as medições recuperadas sejam não nulas, e comparadas em intervalos de tempo fixos. A viabilidade também é sustentada pelo fato de que entre duas medições consecutivas com intervalos de 15 minutos, as variações nos níveis de briquetes, bloco e medições externas sejam de poucos milímetros.

(b) Os dados de nível armazenados em cada *struct* representam as medições entre a tampa inteligente e a superfície da pasta (briquetes e bloco). No entanto, é crucial aplicar um cálculo operacional que transforma as medições de nível coletadas pela tampa em medidas da pasta sólida de briquetes e bloco. Este

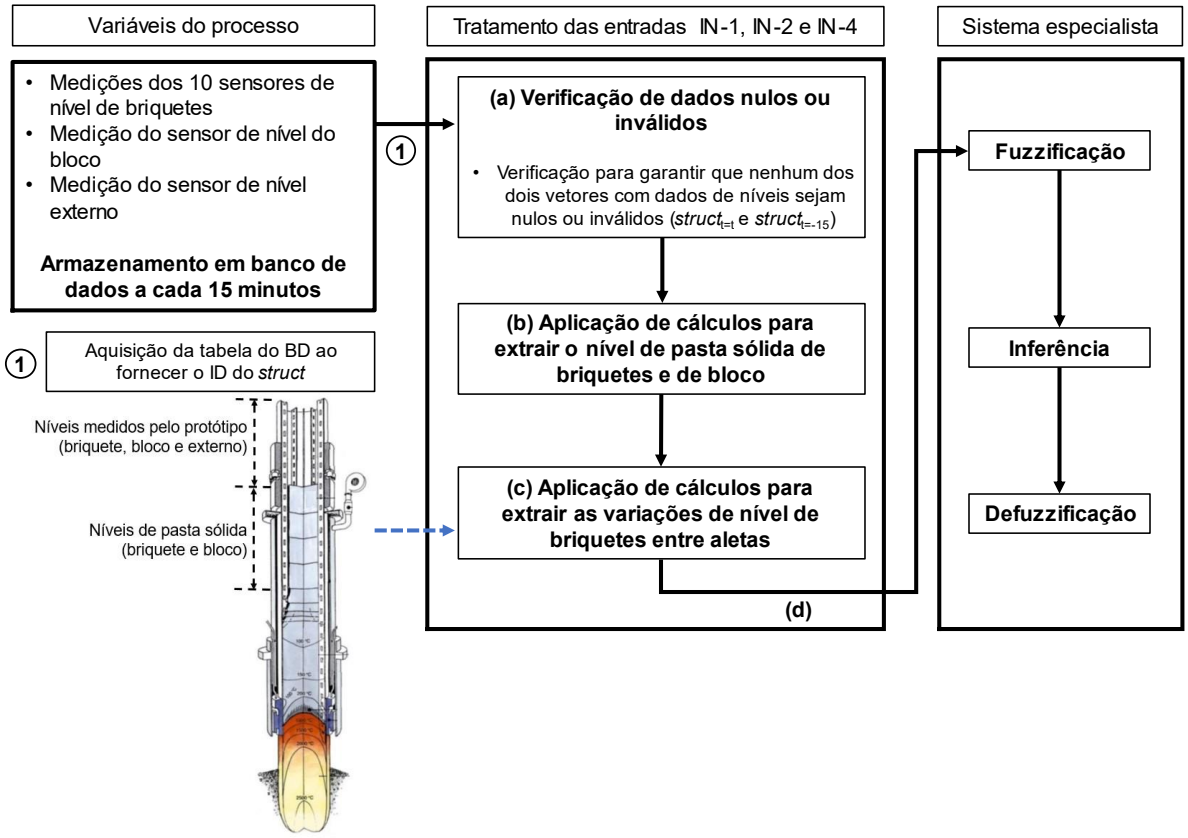
[34] Ao projetar uma interface de usuário, é viável substituir o ID pelo *timestamp*, ou seja, pelo momento em que os dados de nível foram registrados nessa tabela. Isso permitirá que o usuário insira a data desejada para e realizar a consulta da estimativa dos riscos potenciais na formação do eletrodo.

cálculo também é aplicado antecedendo a etapa que define a variação do nível de briquetes, apresentado posteriormente em (c). Por motivos de confidencialidade dos detalhes do processo, o conteúdo e o procedimento do cálculo serão omitidos.

(c) A extração da variação do nível de briquetes entre aletas é executado individualmente para cada nível monitorado entre aletas, i.e, ao todo são 10 variações referentes ao nível de briquetes. O cálculo é realizado usando o módulo da diferença entre os elementos correspondentes dos vetores de nível de pasta sólida de briquetes retornados no item (b).

(d) Após as etapas anteriores, as entradas referentes aos dados de nível estão tratadas para avançar para o bloco de fuzzificação do sistema especialista.

Figura 23 - Diagrama de blocos simplificado das etapas de tratamento das entradas IN-1, IN-2 e IN-4.



Fonte: Autor (2023).

Tratamento de IN-3: A Figura 25 destaca o diagrama das etapas de tratamento da entrada IN-3, discutidas a seguir.

(a) Na fase inicial de processamento, as duas matrizes de temperatura com dimensões 32x24 das minicâmeras térmicas 1 e 2 são consultados para identificar a presença de dados nulos ou inválidos, em cada *struct*. Quando o usuário fornece o ID do *struct*, é iniciada a consulta à tabela para recuperar as matrizes no momento t. No caso de uma ou ambas as matrizes conterem dados nulos ou inválidos, uma nova consulta é realizada automaticamente com o ID reduzido em uma unidade, e o processo se repete. É importante destacar que, para manter a consistência no desenvolvimento do sistema especialista, o ID, no tratamento dos dados de nível e de temperatura, é o mesmo, i.e, sempre pertencem ao mesmo *struct* de dados. Assim há garantia de que os dados avaliados no sistema especialista, posteriormente, pertencem ao mesmo *struct*.

(b) Em seguida, é delimitado a região de interesse das matrizes que compõem as imagens térmicas. Inicialmente é definida a *bounding box* na cor branca, para cada uma das imagens geradas das matrizes térmicas, como discutido na seção 3.3. Entretanto, ainda é necessário filtrar os dados contidos nela, pois para estimar o evento da segregação e engaiolamento deve-se olhar para a distribuição de temperatura da superfície de briquetes, somente. Este trabalho foi realizado via software e é visualizado na Figura 24 que destaca a eliminação dos elementos centrais da *bounding box* que estão vinculados a temperatura da superfície do bloco, tratando-se do pós processamento da Figura 21. Os pixels desta área do bloco são visualizados na cor preta. Ao final desse processo, dos 768 dados originais de cada matriz, apenas 65 deles são usados como região de interesse.

(c) Na etapa (c) a média entre os elementos correspondentes das duas matrizes de 65 elementos é calculada. A média foi escolhida porque é sensível a *outliers*[35], ou seja, se a amplitude de um dos 65 elementos em

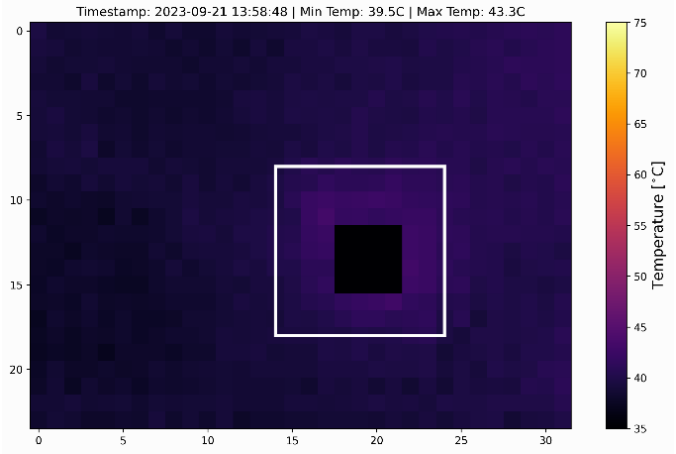
[35] São dados que estão significativamente distantes da maioria dos outros pontos no conjunto de dados.

uma das matrizes for significativamente grande ou pequena, o resultado da média será mais afetado em comparação com o uso da mediana, por exemplo. Espera-se que o sistema seja capaz de detectar essas variações de temperatura na superfície dos briquetes.

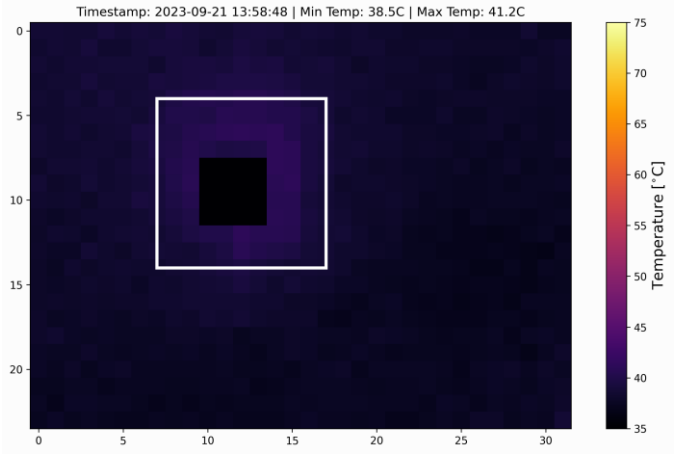
(d) A etapa (c) apresenta em sua saída apenas um vetor de 65 elementos, como resultado da média entre os elementos. Nesta fase é calculada a média entre os elementos deste vetor, resultando em uma grandeza escalar que será chamada de “temperatura média da superfície de briquete” (TMSB), a partir deste ponto do trabalho.

(e) Após as etapas anteriores, a entrada TMSB está tratada para avançar para o bloco de fuzzificação do sistema especialista.

Figura 24 - Extração da distribuição de temperatura da superfície de briquetes.



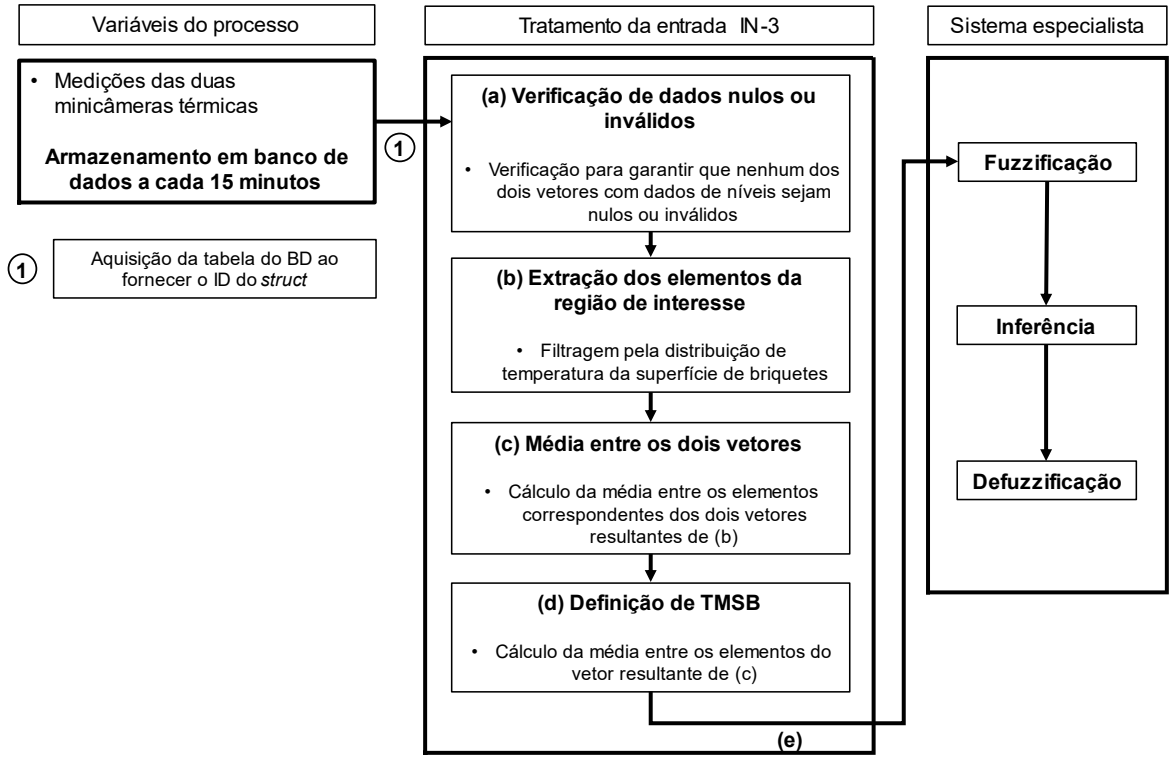
Matriz térmica minicâmera 1



Matriz térmica minicâmera 2

Fonte: Autor (2023).

Figura 25 - Diagrama de blocos simplificado das etapas de tratamento da entrada IN-3.



Fonte: Autor (2023).

3.4.2 **Fuzzificação e defuzzificação**

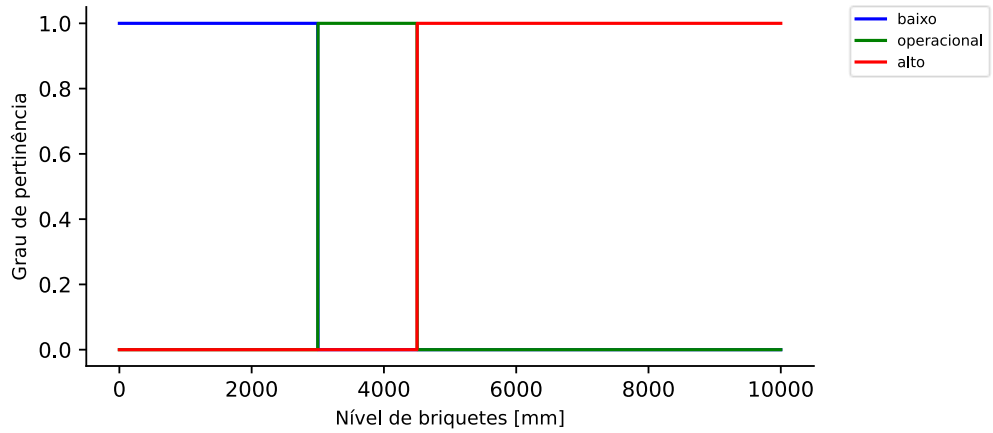
A representação das variáveis de entrada em termos das variáveis linguísticas na Tabela 7, i.e, o processo de fuzzificação, se dá através das funções de pertinência destacadas na Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29.

Os limites de excursão, ou seja, a amplitude das funções, foram estabelecidos com a orientação dos especialistas e operadores da companhia na qual a tampa inteligente foi testada. Também foi consultado estudos no estado da arte para este fim. Esse processo de mapeamento do conhecimento operacional foi fundamental para garantir a representatividade máxima das funções predefinidas.

Para as variáveis de entrada foram adotadas funções trapezoidais por serem representações fidedignas dos cenários de atuação destas. Por exemplo, na Figura 26 a variável “Nível de briquetes” possui três valores linguísticos, sendo eles, “baixo”, “operacional” e “alto”. Nesse contexto, há uma faixa constante em que o nível de

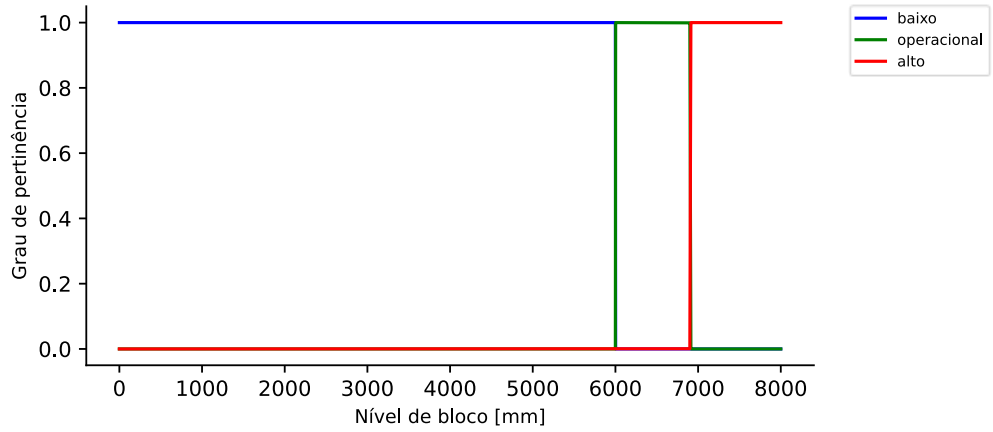
briquete é considerado dentro dos limites de operação, e, portanto, a função trapezoidal é uma boa representação do significado linguístico “operacional”, pois à medida que o nível de briquetes se afasta desta faixa, o seu pertencimento ao conjunto difuso “operacional” decresce e se torna menor que a unidade. Em contrapartida, o pertencimento ao conjunto difuso “baixo” aumentará, se o nível diminuir, e caso contrário, o pertencimento ao conjunto “alto” que será maior. Essa análise pode ser empregada para justificar o formato de todas as funções de pertinência desta variável e das demais.

Figura 26 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de entrada nível de briquetes pós-tratamento.



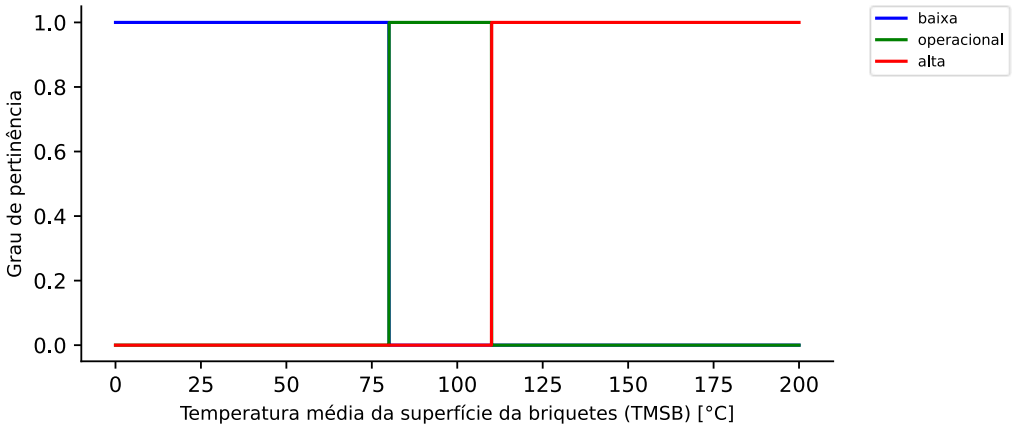
Fonte: Autor (2023).

Figura 27 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de entrada nível de bloco pós-tratamento.



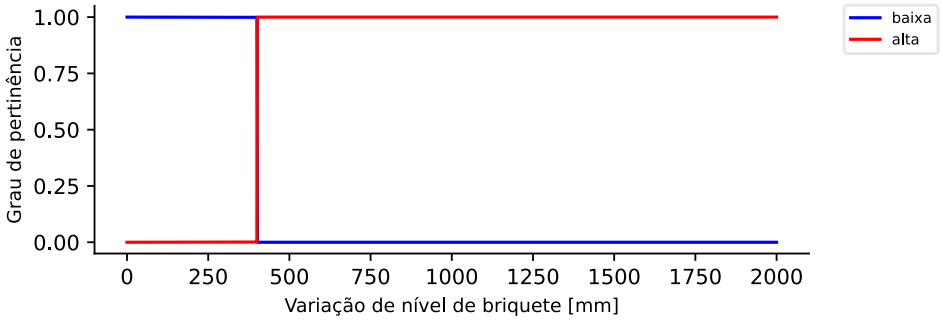
Fonte: Autor (2023).

Figura 28 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de entrada temperatura média da superfície de briquetes pós-tratamento.



Fonte: Autor (2023).

Figura 29 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de entrada variação do nível de briquete da pasta pós-tratamento.



Fonte: Autor (2023).

Junto ao processo de fuzzificação, a tabela de regras do sistema baseado em lógica difusa desempenha um papel fundamental para compreensão da relação entre as variáveis de entrada pós processadas, a fim de inferir o grau dos riscos potenciais na formação do eletrodo Søderberg. Nesse cenário, a experiência dos especialistas do processo é fundamental na definição da composição dessas regras conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Regras do sistema para detecção de riscos potenciais na formação do eletrodo Søderberg.

Regra	Nível de briquete	Operador fuzzy	Nível de bloco	Operador fuzzy	Variação do nível de briquete	Operador fuzzy	TMSB	Saída 1 Simetria de pasta	Saída 2 Segregação	Saída 3 Engaiolamento
1	baixo	AND	baixo	---	---	---	---	Alarme03	---	---
2	oper	AND	baixo	---	---	---	---	Alarme01	---	---
3	baixo	AND	oper	---	---	---	---	Alarme02	---	---
4	oper	AND	oper	---	---	---	---	Alarme00	---	---
5	(NOT baixo AND NOT oper)	OR	(NOT baixo AND NOT oper)		---	---	---	Alarme00	---	---
6	---	---	---	---	---	---	alta	---	Alarme01	---
7	---	---	---	---	---	---	(oper OR baixa)	---	Alarme00	---
8	alto	---	---	AND	baixa	AND	baixa	---	---	Alarme01
9	NOT alto	---	---	OR	NOT baixa	OR	NOT baixa	---	---	Alarme00

Fonte: Autor (2023).

Primeiramente, antes de justificar a composição das regras, serão exploradas a seguir, as últimas três colunas da Tabela 8, preenchidas pelas saídas do SE, que juntas destacam o indicativo de detecção de riscos potenciais.

A variável “Saída 1” está relacionada com o grau de simetria da pasta eletródica, e é representada qualitativamente por quatro variáveis linguísticas: “Alarme00” indica que nenhuma ação deve ser tomada, pois não há necessidade de realimentar com pasta. O “Alarme01” aponta a necessidade de alimentar apenas com pasta em formato bloco. O “Alarme02” ressalta a alimentação com briquetes, apenas, enquanto o “Alarme03” assinala que deve ser realizada alimentação de ambos os formatos de pasta.

A variável “Saída 2” designa o indicativo de segregação da pasta, e é traduzida por duas variáveis linguísticas: “Alarme00” aponta que não há ocorrência de segregação, em contraponto, o “Alarme01” é um indicativo de detecção deste risco potencial na formação do eletrodo.

A variável “Saída3” denota o indicativo de engaiolamento da pasta, representada por duas variáveis linguísticas: “Alarme00” destaca que não há detecção de engaiolamento, enquanto o “Alarme01” é um indicativo de pasta engaiolada.

Mediante o exposto acima, dá-se continuidade com a justificativa da primeira regra. Em uma condição em que o nível de briquete e de bloco sejam baixos, a “Saída1” dispara o “Alarme03”, apontando a necessidade de realimentação de ambos os tipos de pasta. Na segunda regra, é apresentado o cenário em que o nível de briquetes está em condições normais de operação, porém o nível de bloco é baixo. Logo, o processo de inferência, designa o “Alarme01” na “Saída 1”, visto a demanda de reposição da pasta em formato bloco, apenas. A regra 3 destaca a situação oposta da segunda regra, em que a “Saída 1” indica a reposição de briquetes, apenas. No cenário da quarta regra, ambos os níveis estão sob condições operacionais, e com isso a “Saída 1” dispara “Alarme00”, sendo essa a condição ideal de operação, pois não há nenhum indício de risco potencial à formação do eletrodo. A quinta regra é ativada quando nenhuma das regras anteriores entra nesse estado, considerando que as demais combinações entre as variáveis linguísticas das entradas nível de briquete e nível de bloco devem acionar o “Alarme00” na “Saída 1”, por tratarem de condições operacionais em que nenhuma ação precisa ser tomada quanto a alimentação de pasta.

A sexta regra está associada à detecção de segregação e este risco vincula-se diretamente com a alta de TMSB, considerando que a zona com material segregado apresenta perfil de temperatura superior em relação a pasta sólida, como abordado na subseção 2.2.2. Neste cenário, a “Saída 2” assume o estado “Alarme01”.

A sétima regra monitora o estado de TMSB e caso a variável assuma os valores linguísticos operacional ou baixa, a “Saída 2” acusa a ausência de segregação, indicando “Alarme00”.

A oitava regra está associada à detecção de engaiolamento. Este evento relaciona-se ao nível de briquete alto, baixa variação de nível e briquetes e baixa temperatura na superfície de briquetes, conforme abordado na subseção 2.2.3. Neste cenário, a “Saída 3” assume o estado “Alarme01”.

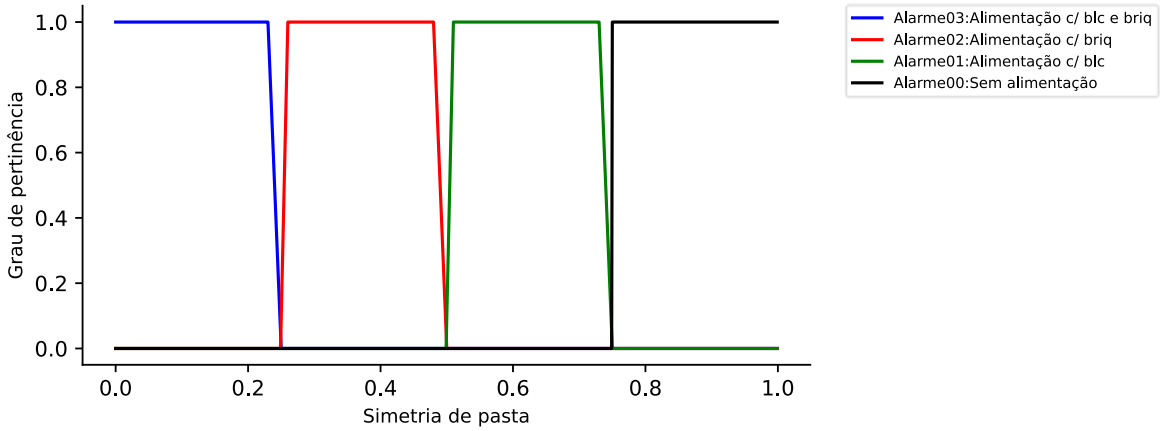
A nona regra é ativada quando a oitava regra não entra no estado de ativação, considerando que as demais combinações entre as variáveis linguísticas das entradas

nível de briquete, variação do nível de briquete e TMSB devem acionar o “Alarme00” na “Saída 3”.

Uma vez estabelecidas as regras do sistema, foram definidas as funções de pertinência que retratam os valores linguísticos das saídas, ilustradas na Figura 30, Figura 31 e Figura 32. Foram empregadas funções no formato trapezoidal por serem a melhor representação para a indicação dos alarmes definidos em cada saída.

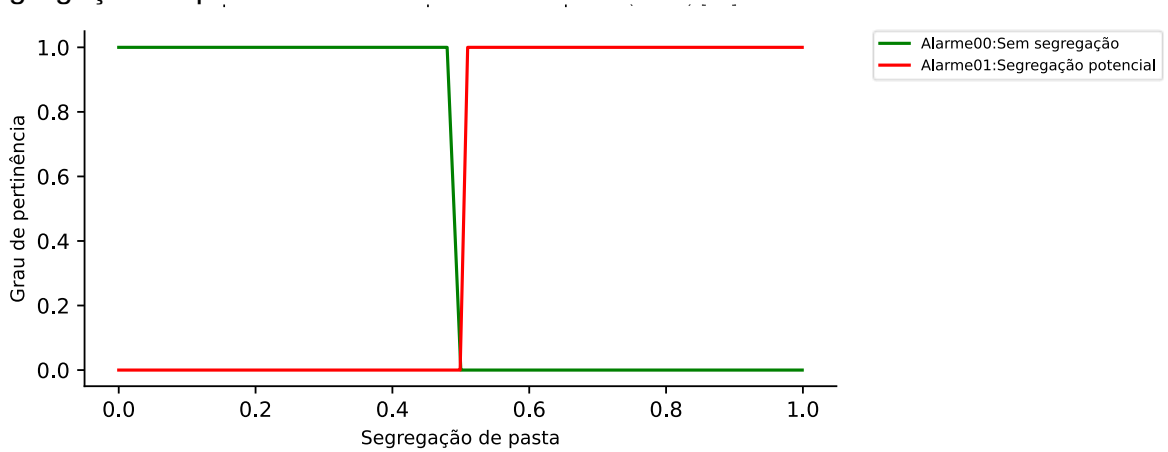
O método de defuzzificação empregado foi o *bisector*, que mediante testes e avaliação apresentou o melhor resultado para o formato das funções de pertinência estabelecidos.

Figura 30 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de saída simetria de pasta.



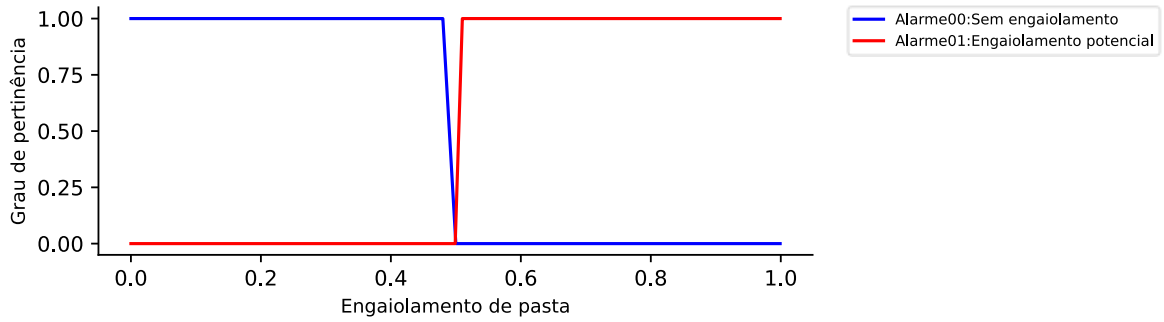
Fonte: Autor (2023).

Figura 31 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de saída segregação de pasta.



Fonte: Autor (2023).

Figura 32 - Funções de pertinência e valores linguísticos da variável de saída engaiolamento de pasta.



Fonte: Autor (2023).

4 RESULTADOS

Os resultados serão explorados considerando os dados de nível de pasta sólida no instante t = 21/09/2023 13:59 e t-15 = 21/09/2023 13:44, destacados na Tabela 9 e Tabela 10, respectivamente. A Tabela 11 apresenta a variação do nível de pasta sólida de briquetes entre os instantes t e t-15.

Tabela 9 – Medições de nível consultadas no instante t = 21/09/2023 13:59.

ID do sensor	Timestamp	Medições
Sensor de nível – Aleta 1	21/09/2023 13:59	3188 mm
Sensor de nível – Aleta 2	21/09/2023 13:59	3048 mm
Sensor de nível – Aleta 3	21/09/2023 13:59	2969 mm
Sensor de nível – Aleta 4	21/09/2023 13:59	4905 mm
Sensor de nível – Aleta 5	21/09/2023 13:59	3997 mm
Sensor de nível – Aleta 6	21/09/2023 13:59	4073 mm
Sensor de nível – Aleta 7	21/09/2023 13:59	3831 mm
Sensor de nível – Aleta 8	21/09/2023 13:59	4246 mm
Sensor de nível – Aleta 9	21/09/2023 13:59	3741 mm
Sensor de nível – Aleta 10	21/09/2023 13:59	3331 mm
Sensor de nível – Bloco	21/09/2023 13:59	6771 mm
Sensor de nível – Externo	21/09/2023 13:59	6141 mm

Fonte: Autor (2023).

Tabela 10 – Medições de nível consultadas no instante t -15 = 21/09/2023 13:44.

ID do sensor	Timestamp	Medições
Sensor de nível – Aleta 1	21/09/2023 13:44	3191 mm
Sensor de nível – Aleta 2	21/09/2023 13:44	3050 mm
Sensor de nível – Aleta 3	21/09/2023 13:44	2973 mm
Sensor de nível – Aleta 4	21/09/2023 13:44	4906 mm
Sensor de nível – Aleta 5	21/09/2023 13:44	3990 mm
Sensor de nível – Aleta 6	21/09/2023 13:44	4077 mm
Sensor de nível – Aleta 7	21/09/2023 13:44	3829 mm
Sensor de nível – Aleta 8	21/09/2023 13:44	4247 mm
Sensor de nível – Aleta 9	21/09/2023 13:44	3736 mm
Sensor de nível – Aleta 10	21/09/2023 13:44	3333 mm
Sensor de nível – Bloco	21/09/2023 13:44	6774 mm
Sensor de nível – Externo	21/09/2023 13:44	6142 mm

Fonte: Autor (2023).

Tabela 11 - Variação de nível de briquetes entre instante t e t-15.

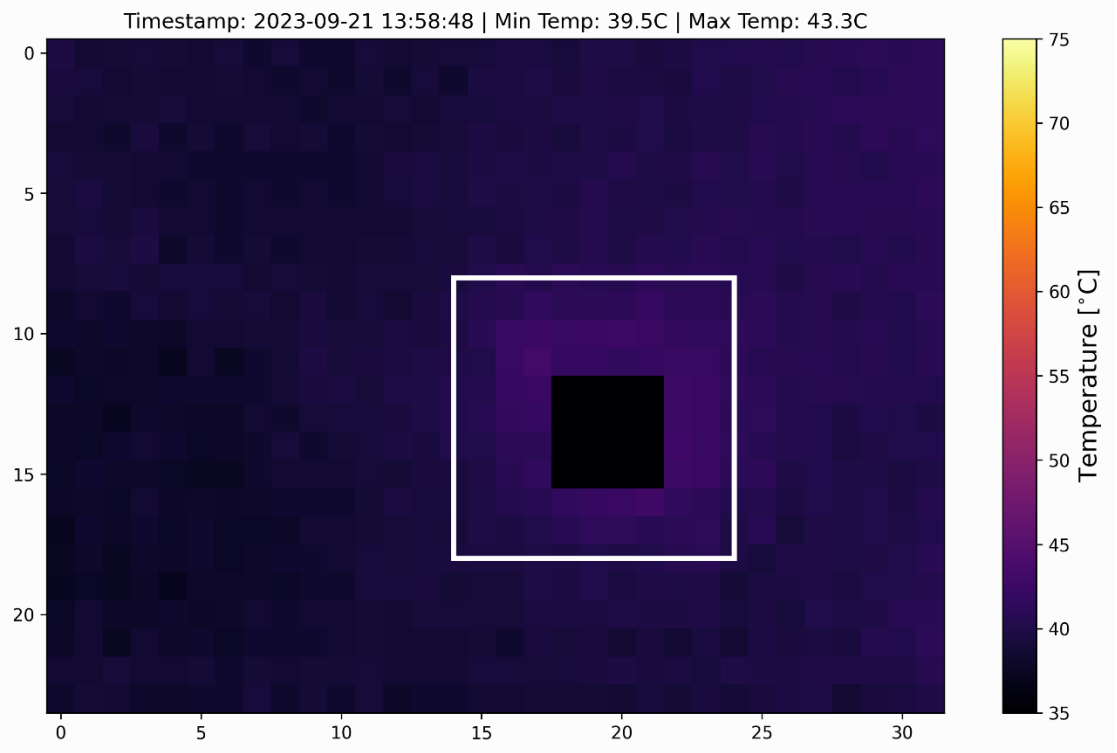
ID do sensor	Variação do nível de briquete
Aleta 1	3,0 mm
Aleta 2	2,0 mm
Aleta 3	4,0 mm
Aleta 4	1,0 mm
Aleta 5	7,0 mm
Aleta 6	4,0 mm
Aleta 7	2,0 mm
Aleta 8	1,0 mm
Aleta 9	5,0 mm
Aleta 10	2,0 mm

Fonte: Autor (2023).

A representação visual da região de interesse das matrizes de temperatura para extrair TMSB no instante de tempo t são apresentadas na Figura 33 e Figura 34. É importante notar que o instante t mencionado aqui difere por alguns segundos em relação ao mesmo instante t da Tabela 9. Isso ocorre devido ao fato de que a aquisição e armazenamento destas variáveis são executados sequencialmente e não em paralelo. Portanto, é esperada essa pequena diferença de tempo.

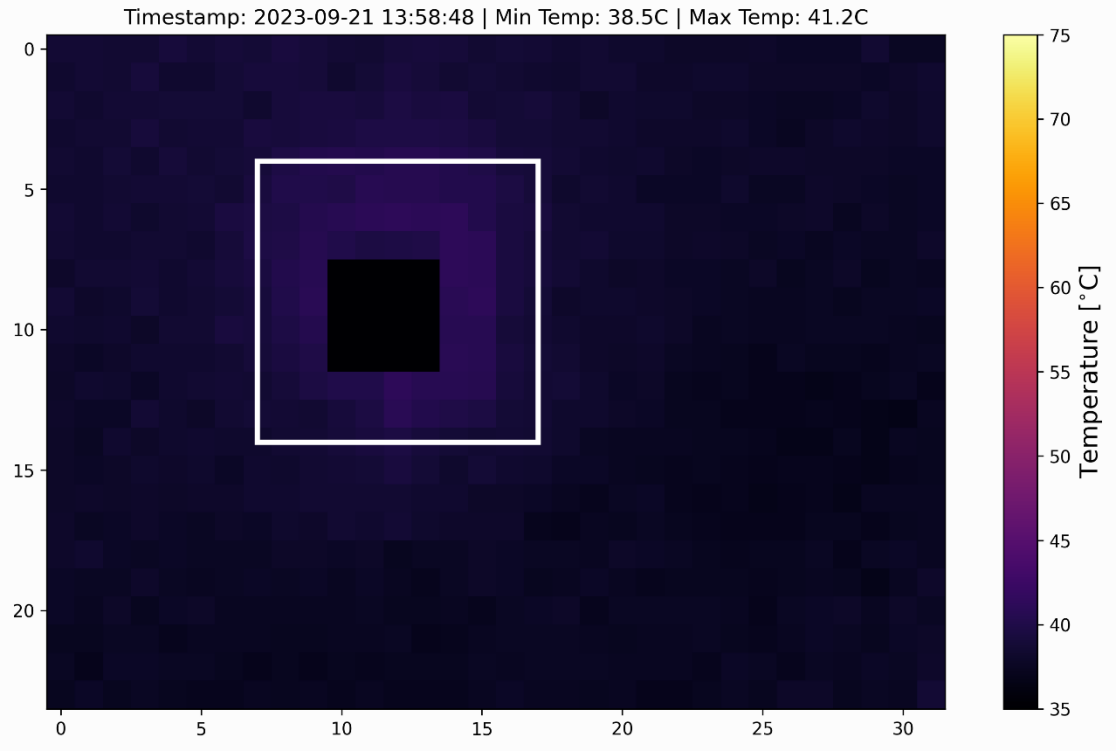
O resultado do cálculo de TMSB para as matrizes dos cenários da Figura 33 e Figura 34 é 40,82 °C.

Figura 33 - Representação gráfica da distribuição de temperatura da superfície de briquetes no instante de tempo t – minicâmera 1.



Fonte: Autor (2023).

Figura 34 - Representação gráfica da distribuição de temperatura da superfície de briquetes no instante de tempo t – minicâmera 2.



Fonte: Autor (2023).

A seguir, é demonstrado graficamente como o processo de defuzzificação e as regras *fuzzy* influenciam as três saídas. Todos os resultados consideram os dados de entrada apresentados anteriormente, no início desta seção. Destaca-se que o sistema especialista baseado foi implementado usando a linguagem de programação Python®, utilizando especificamente a biblioteca *scikit fuzzy* para manipulação do SE.

Inicialmente serão explorados os resultados de simetria de pasta, com ênfase na Figura 35 e nas demais até a Figura 44. Cada figura contém as seguintes características:

- As funções pertinência de saída, são representadas por "Alarme03", "Alarme02", "Alarme01" e "Alarme00" no gráfico com diferentes cores (azul, vermelho, verde e preto, respectivamente). Essas funções trapezoidais indicam o grau de pertinência de cada regra para diferentes valores de simetria de pasta.
- A função de pertinência agregada é criada combinando as contribuições de todas as funções de pertinência de saída e é representada pela área sombreada em laranja. A agregação é feita ponto a ponto ao longo do eixo x (simetria de pasta). Em cada ponto, a função de pertinência agregada toma o valor máximo entre as contribuições das várias funções de pertinência para determinar a contribuição máxima nesse ponto. Por exemplo, no caso da Figura 35, a função agregada para "Alarme00" será 1, pois para as entradas fornecidas, ambos os valores de nível de pasta sólida de briquete (3188 mm) e nível de pasta sólida de bloco (6771 mm) ativam a função de pertinência "Alarme00" com um grau de pertinência igual a 1[36]. Isso significa que, com base nessas entradas, a pertinência da simetria de pasta à regra "Alarme00" é máxima (100%), e a função agregada reflete isso.
- Uma linha vertical é desenhada no gráfico na posição onde ocorre a defuzzificação. Essa linha indica o valor de simetria de pasta determinado com base nas regras *fuzzy* e nas entradas do sistema. A posição da linha é onde a função de pertinência agregada atinge seu ponto mais alto.

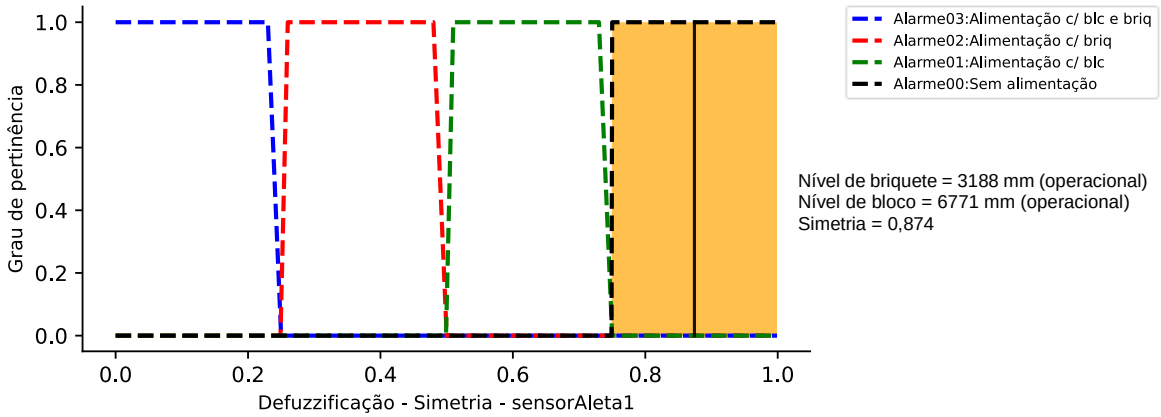
---

[36] A ativação da regra 4, ocorre da seguinte forma: nível_briq = 3188 (baixo:0, oper:1, alto:0) e nível_bloc = 6771 (baixo:0, oper:1, alto:0). IF nível_briq IS (operacional) AND nível_bloco IS (operacional) THEN ASSIMETRIA IS (Alarme00). Logo, Alarme00 = MIN(nível_briq, nível_bloc) = MIN(1, 1) = 1.

- Os eixos x e y são devidamente rotulados. O eixo x representa o processo de defuzzificação, enquanto o eixo y representa o grau de pertinência das funções de pertinência. Quanto mais próximo de 1 o valor assumido na defuzzificação, maior o grau de simetria de pasta com relação a faixa operacional desejada.

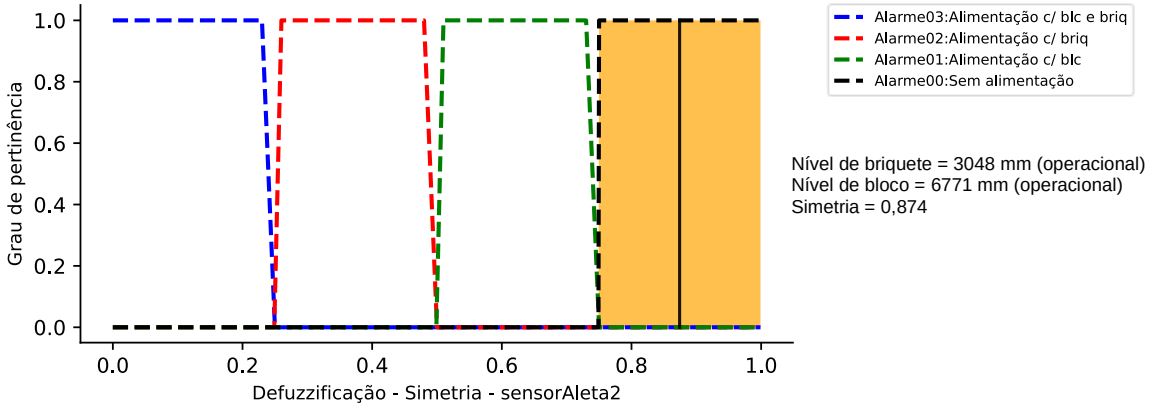
Com exceção da Figura 37, as demais mostram que para os dados de nível de pasta de sólida de briquete e nível de pasta sólida de bloco, o “Alarme00” foi ativado, devido a ambas entradas apresentarem amplitude em estado operacional, i.e, não havendo necessidade de realimentar a coluna monitorada com pasta eletródica. Em contraponto, na Figura 37, a entrada relacionada ao nível de pasta de briquete assume o valor linguístico baixo, e por isso a função de pertinência de saída vinculada ao “Alarme02” apresenta grau de pertinência igual a 1. Logo, a zona monitorada pelo sensor laser da aleta 3, deveria ter seu nível de pasta sólida de briquete mais acima. Essa inconformidade de processo pode ser ajustada realizando a reposição de briquetes exclusivamente nessa região. Ao fazê-lo dessa maneira, o nível de pasta como um todo estaria novamente em condições operacionais.

Figura 35 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 1.



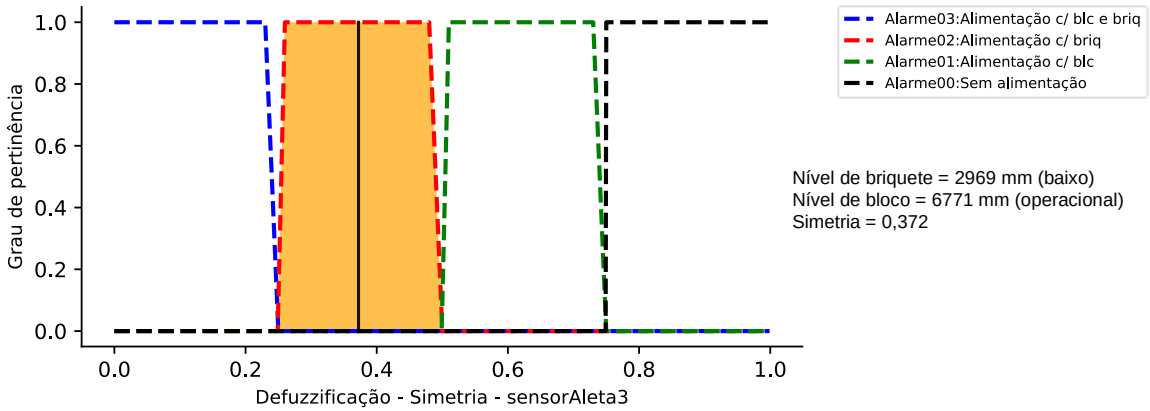
Fonte: Autor (2023).

Figura 36 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 2.



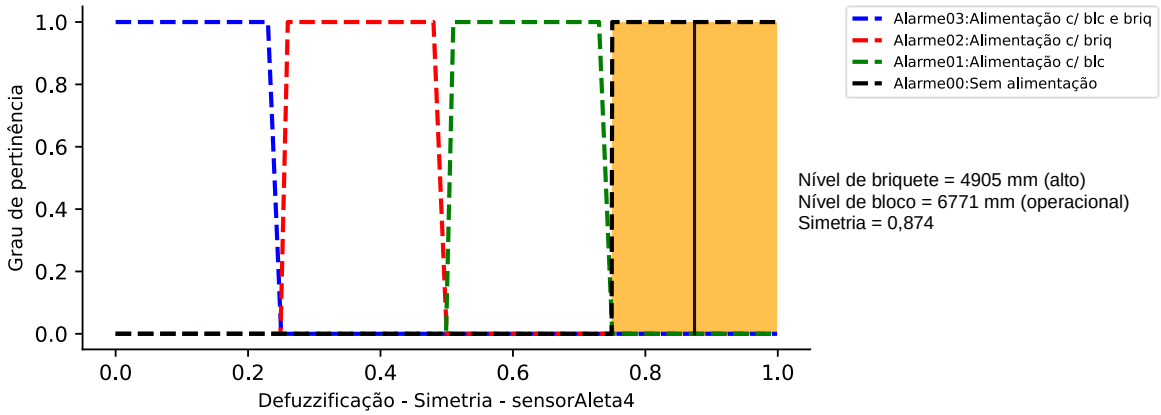
Fonte: Autor (2023).

Figura 37 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 3.



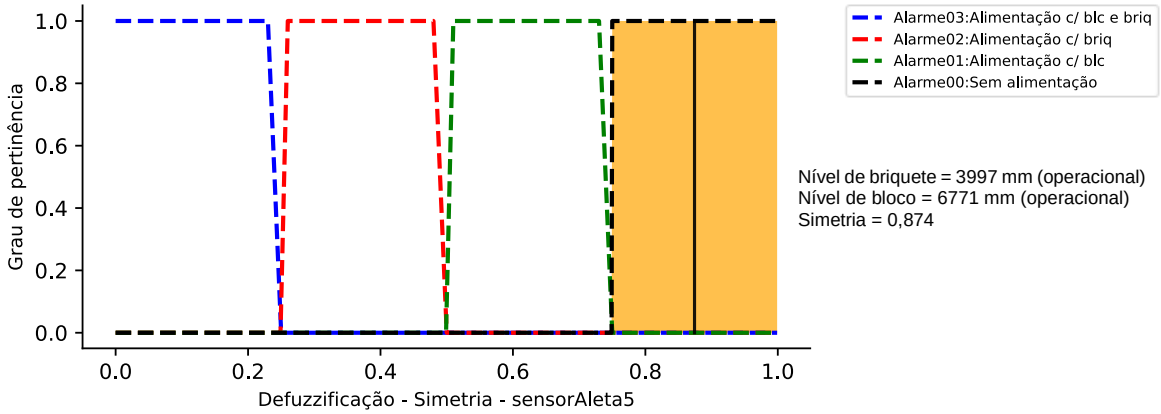
Fonte: Autor (2023).

Figura 38 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 4.



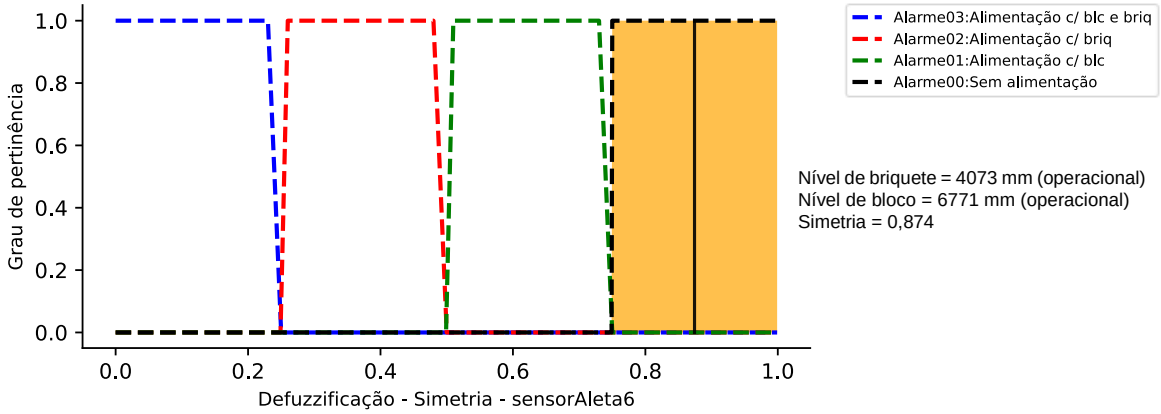
Fonte: Autor (2023).

Figura 39 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 5.



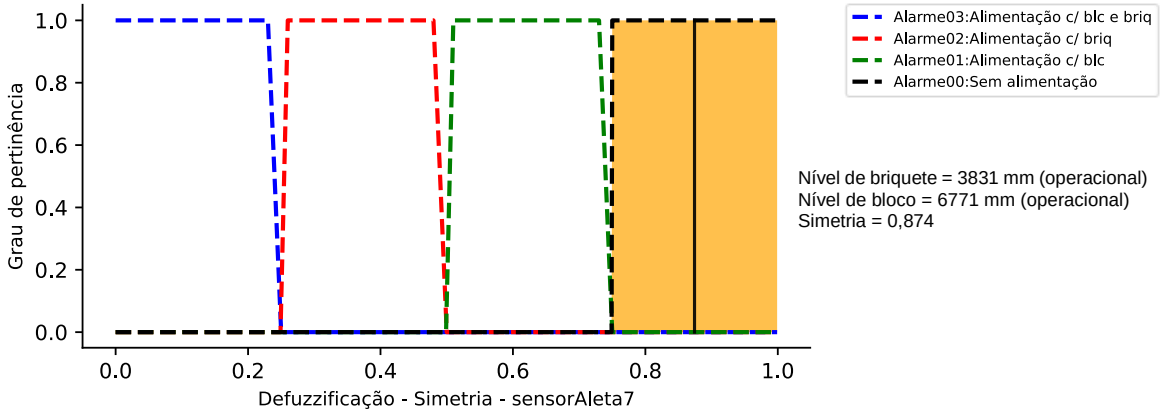
Fonte: Autor (2023).

Figura 40 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 6.



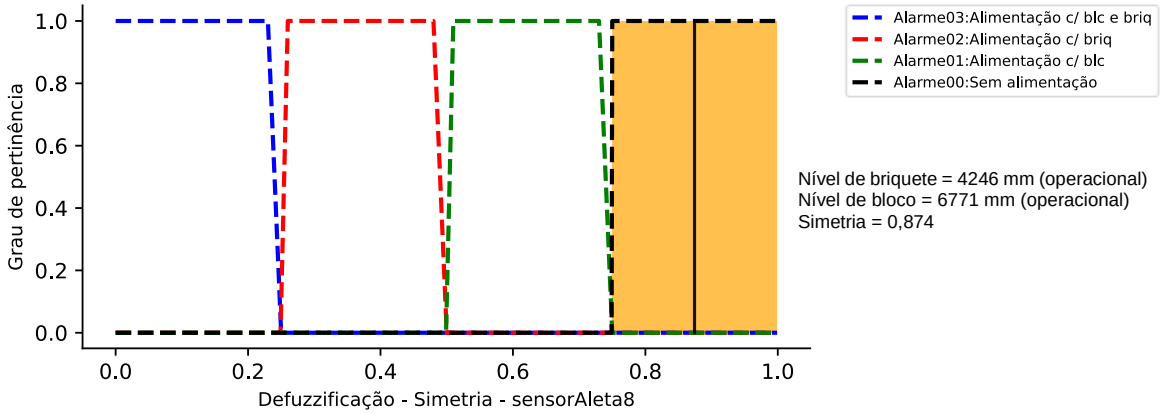
Fonte: Autor (2023).

Figura 41 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 7.



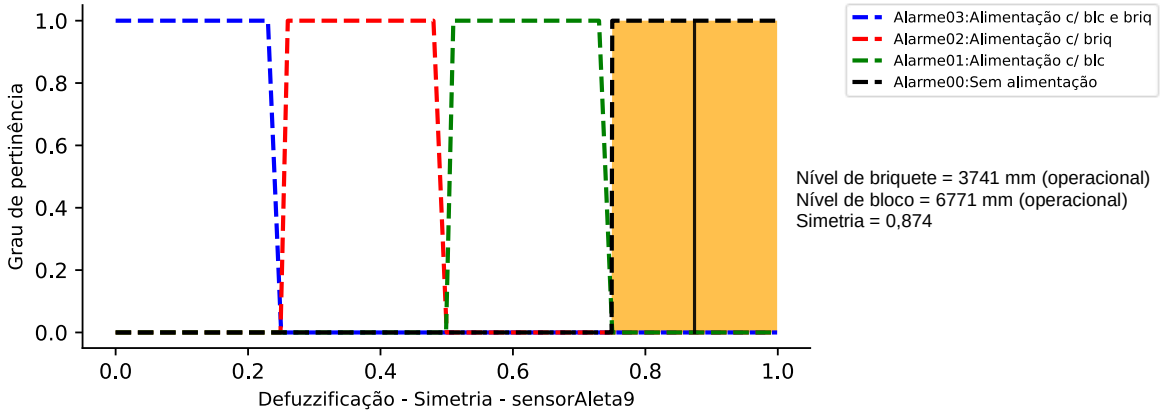
Fonte: Autor (2023).

Figura 42 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 8.



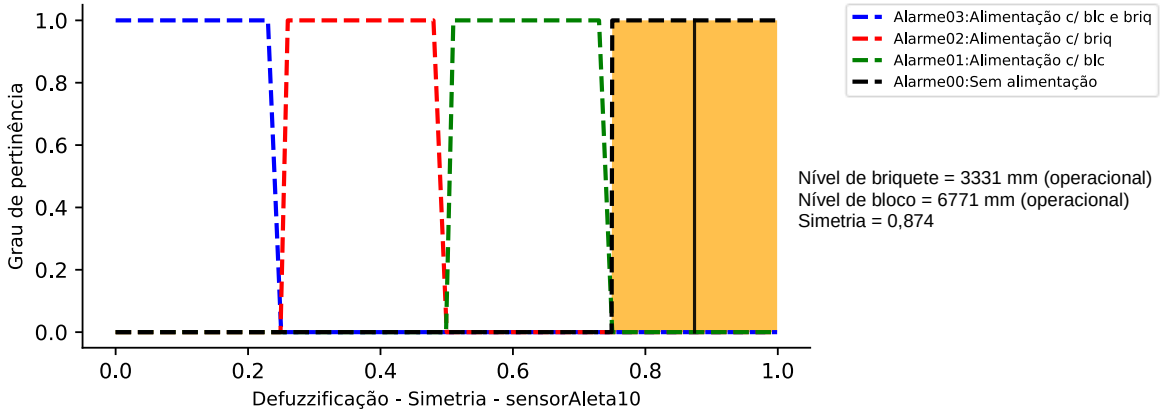
Fonte: Autor (2023).

Figura 43 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 9.



Fonte: Autor (2023).

Figura 44 - Grau de simetria no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 10.

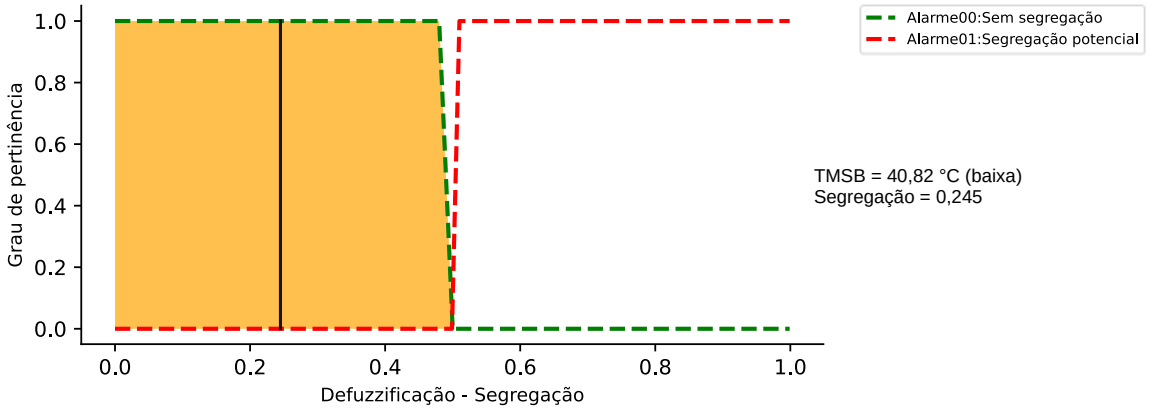


Fonte: Autor (2023).

A Figura 45 retrata a estimativa do SE quanto ao grau de segregação de pasta. Nela pode-se destacar as seguintes características:

- As funções pertinência de saída, são representadas por "Alarme00" e "Alarme01" no gráfico com diferentes cores (verde e vermelho, respectivamente). Essas funções trapezoidais indicam o grau de pertinência de cada regra para diferentes valores de segregação.
- Para o cenário indicado na Figura 45, em que a única entrada (TMSB) assume o valor 40,82 °C implica na ativação da função de pertinência “Alarme00” com grau de pertinência igual a 1[37]. Por isso a função de pertinência agregada (região em laranja) é a área sob o “Alarme 00”, pois o “Alarme 01” não foi ativado. Para OUT-2 indicar segregação potencial sendo formada na coluna monitorada, TMSB deveria ser igual ou superior à 110°C.
- A linha vertical preta destacada indica o valor de segregação de pasta determinado no processo de defuzzificação. A posição da linha é onde a função de pertinência agregada atinge seu ponto mais alto.
- O eixo x representa o processo de defuzzificação, enquanto o eixo y representa o grau de pertinência das funções de pertinência. Quanto mais próximo de 1 o valor assumido na defuzzificação, maior o grau potencial de segregação de pasta.

Figura 45 - Grau de segregação no instante t = 21/09/2023 13:59.



Fonte: Autor (2023).

[37] A ativação da regra 7, ocorre da seguinte forma: TMSB = 40,82 (baixa:1, oper:0, alto:0). IF TMSB IS (baixa) OR TMSB IS (oper) THEN SEGREGRAÇÃO IS (Alarme00). Logo, Alarme00 = MAX($TMSB_{BAIXA}$, $TMSB_{OPER}$) = MAX(1, 0) = 1.

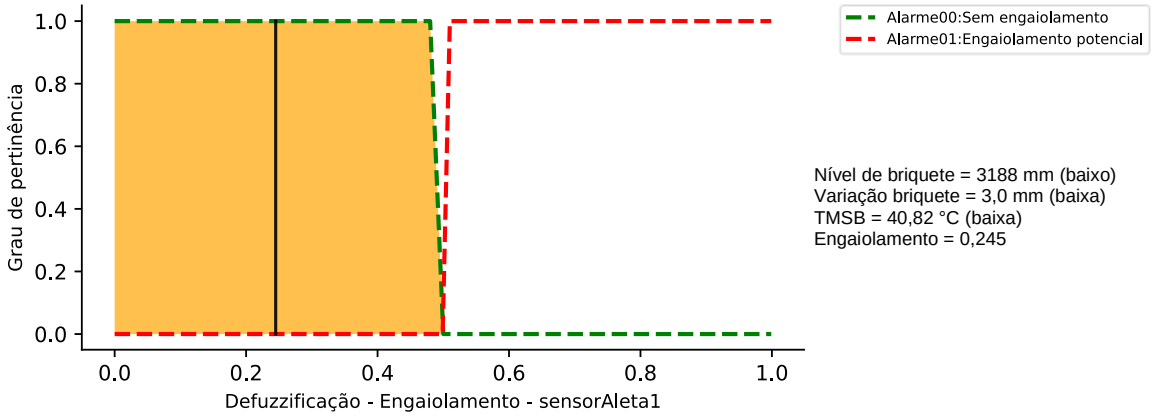
Os resultados de engaiolamento de pasta, são apresentados na Figura 46 e nas demais até a Figura 55. Considerando esta faixa, cada figura contém as seguintes características:

- As funções pertinência de saída, são representadas por "Alarme00" e "Alarme01" no gráfico com diferentes cores (verde e vermelho, respectivamente). Essas funções trapezoidais indicam o grau de pertinência de cada regra para diferentes valores de engaiolamento.
- Para o cenário representando na Figura 46, que registra as seguintes entradas: nível de pasta sólida de briquete igual a 3188 mm, variação de briquete igual a 3,0 mm e TMSB assumindo valor de 40,82 °C, implica na ativação da função de pertinência “Alarme00” com grau de pertinência igual a 1[38]. Por isso a função de pertinência agregada (região sombreada em laranja) é a área sob o “Alarme 00”, pois o “Alarme 01” não foi ativado.
- A linha vertical preta destacada no gráfico indica o valor de engaiolamento de pasta determinado no processo de defuzzificação. A posição da linha é onde a função de pertinência agregada atinge seu ponto mais alto.
- O eixo x representa o processo de defuzzificação, enquanto o eixo y representa o grau de pertinência das funções de pertinência. Quanto mais próximo de 1 o valor assumido na defuzzificação, maior o grau potencial de engaiolamento de pasta.

Com exceção da Figura 49, as demais mostram que para os dados de nível de pasta sólida de briquete, TMSB e variação do nível de briquete, o “Alarme00” foi ativado. O único cenário que culminou na ativação da função de pertinência de saída “Alarme01” está relacionado a zona da aleta 4. A identificação desse risco potencial acarreta maior aquecimento da pasta amolecida e por consequência diminui a viscosidade das camadas superiores, podendo levar a formação de segregação e eletrodos malformados. Desta forma, uma das medidas apresentadas na seção 2.2.3 deve ser adotada para evitar os impactos nocivos deste evento.

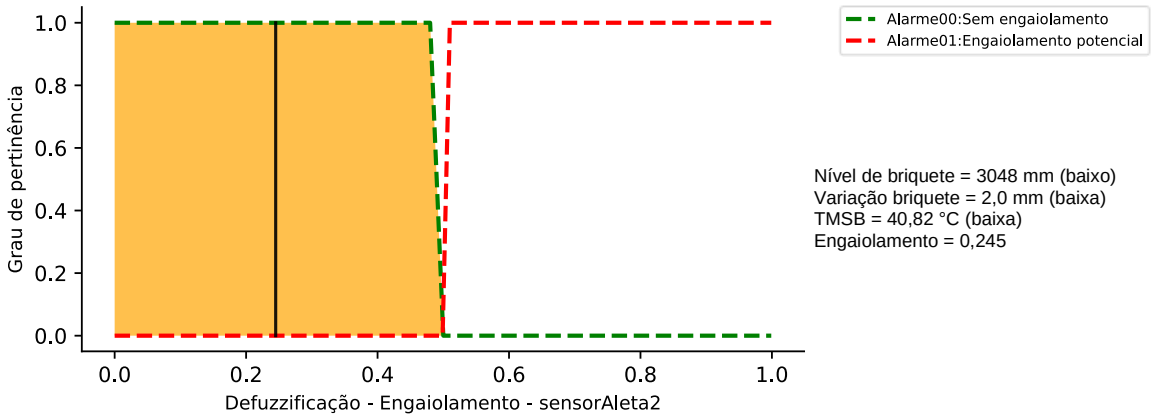
[38] A ativação da regra 9, ocorre da seguinte forma: nível_briq = 3188 (baixo:1, oper:0, alto:0) e TMSB = 40,82 (baixa:1, oper:0, alto:0) e variação_nível_briq = 3,0 (baixa:1, oper:0, alta:0). IF nível_briq IS (alto) and TMSB IS (baixa) and variação_nível_briq IS (baixa) THEN ENGAIOLAMENTO IS (Alarme01) Logo, Alarme00 = MIN(nível_briq, TMSB, variação_nível_briq) = MIN(0, 1, 1) = 0.

Figura 46 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 1.



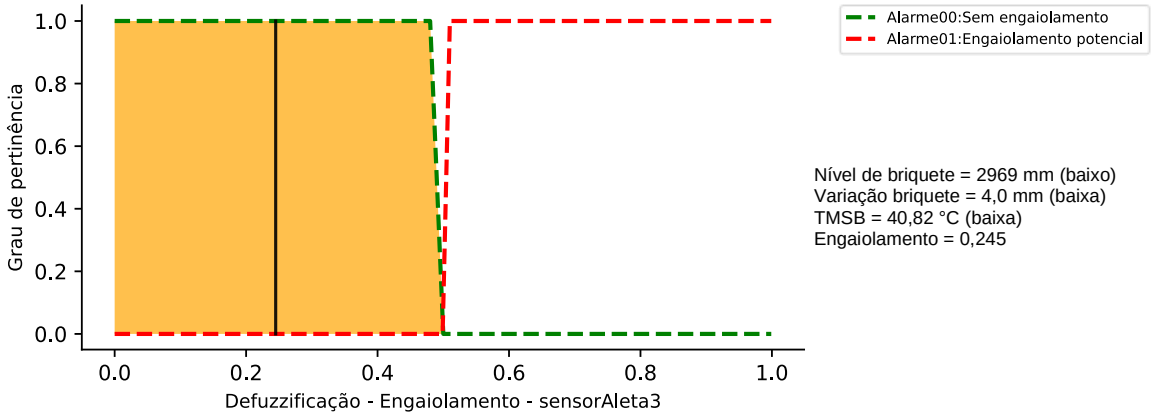
Fonte: Autor (2023).

Figura 47 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 2.



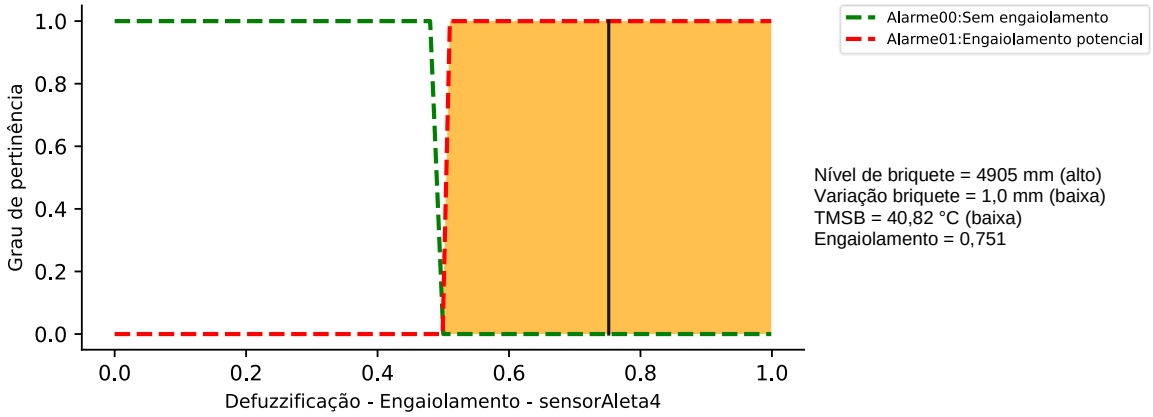
Fonte: Autor (2023).

Figura 48 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 3.



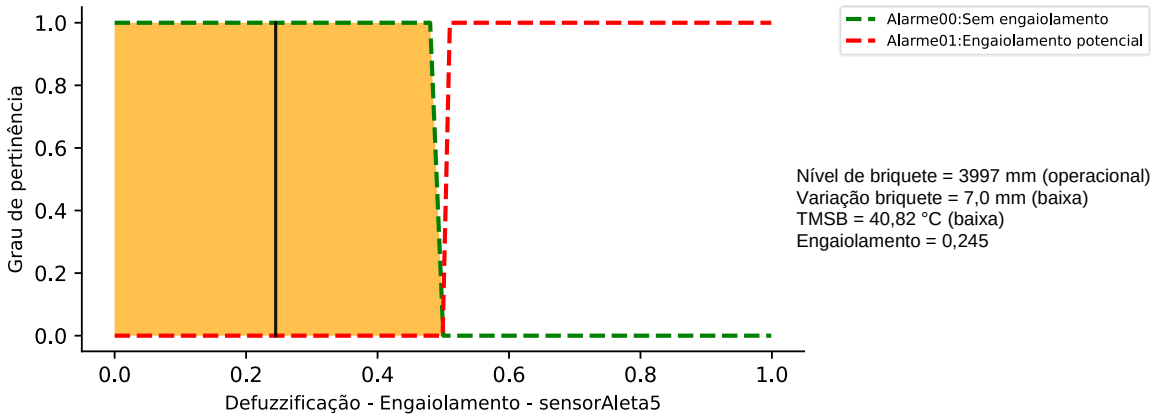
Fonte: Autor (2023).

Figura 49 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 4.



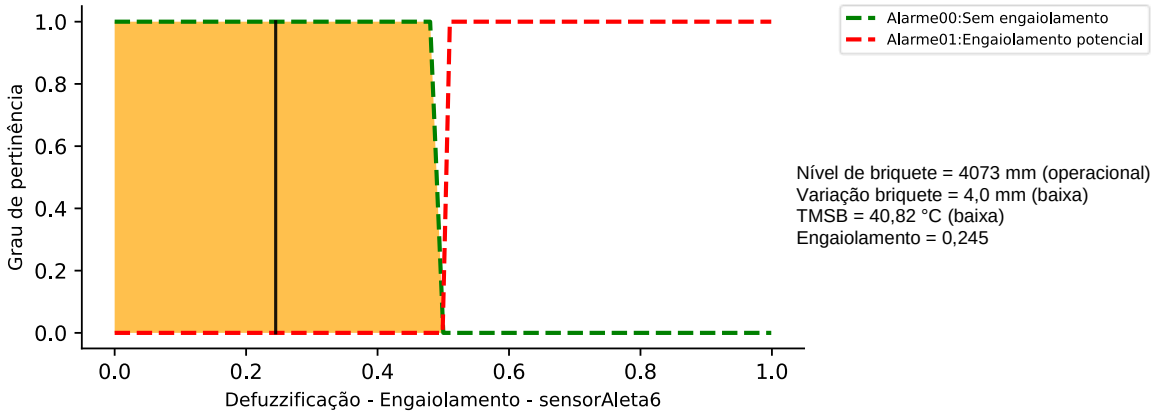
Fonte: Autor (2023).

Figura 50 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 5.



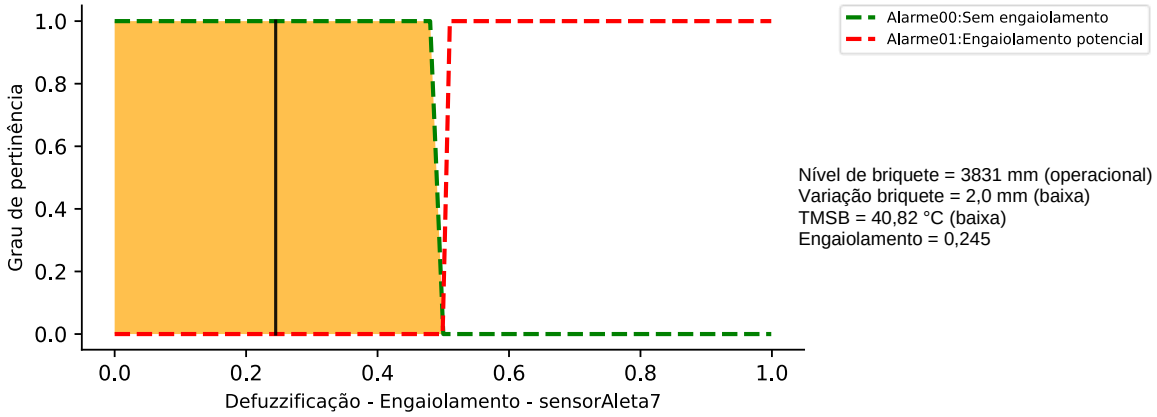
Fonte: Autor (2023).

Figura 51 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 6.



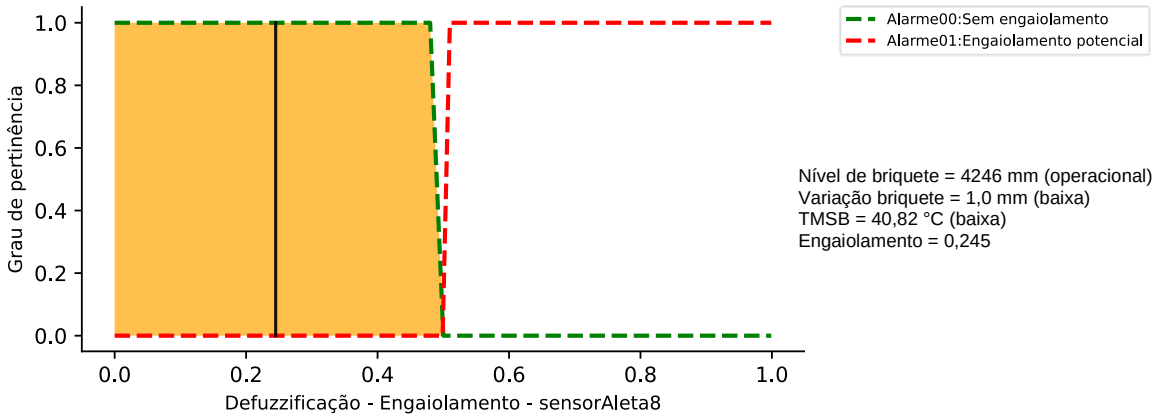
Fonte: Autor (2023).

Figura 52 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 7.



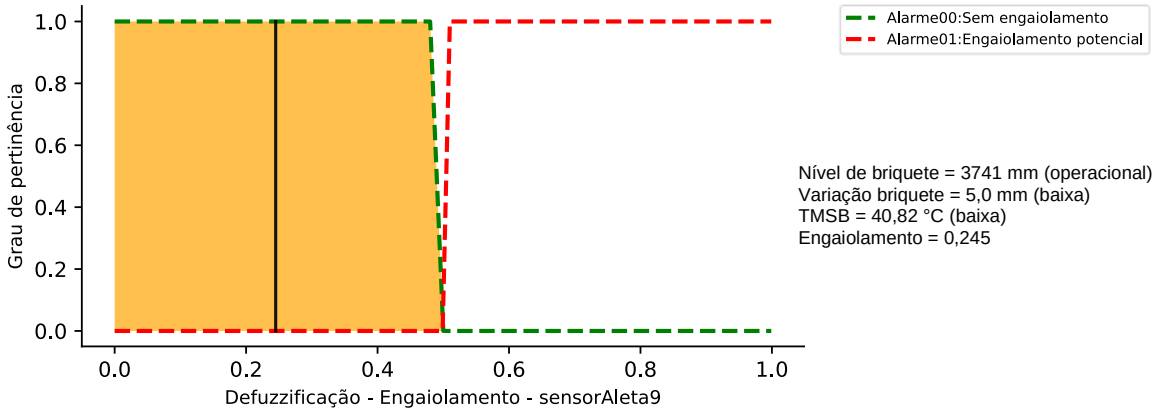
Fonte: Autor (2023).

Figura 53 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 8.



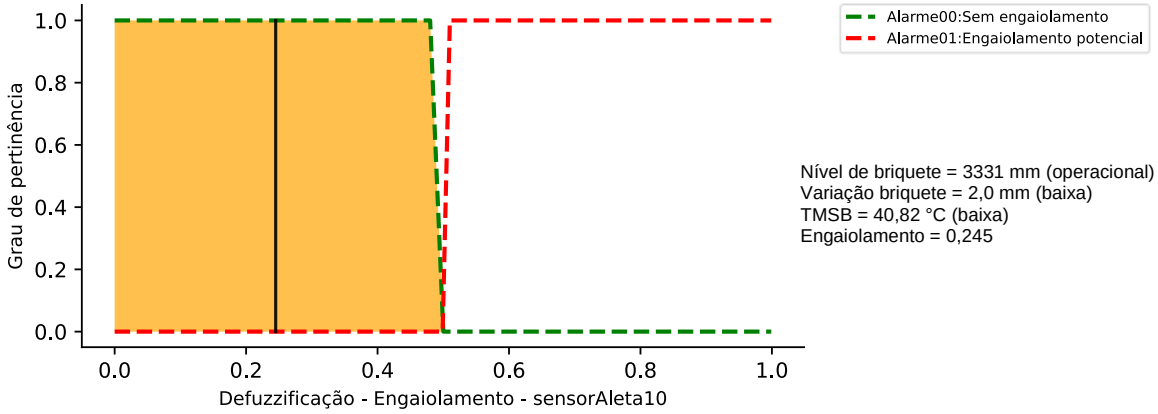
Fonte: Autor (2023).

Figura 54 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 9.



Fonte: Autor (2023).

Figura 55 - Grau de engaiolamento no instante t = 21/09/2023 13:59 - Aleta 10.



Fonte: Autor (2023).

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Como etapa primária deste trabalho, verificou-se que a fase dos testes individuais dos elementos sensores foram fundamentais para confirmar sua operacionalidade, antecedendo à fase de instrumentação da tampa. A câmera térmica indicou resultados representativos da temperatura de superfície da pasta e os sensores de nível registraram medidas consistentes com o teste *in loco*.

Após a fase do teste primário, no qual foram identificadas adaptações mecânicas e de código indispensáveis, o teste secundário evidenciou que a tampa tem potencial atrativo como ferramenta de apoio na rotina diária dos operadores devido a excelente recepção que foi observada, em vista da sua contribuição para o aumento da segurança operacional e padronização das medições relacionadas a pasta eletródica. Essa constatação é relevante, pois assegura que em fase posterior deste trabalho, a companhia produtora de ferroliga, que cedeu o espaço para os testes na sua fábrica, monitore o resultado potencial deste projeto como uma ferramenta auxiliar na detecção de eventos danosos à formação do eletrodo Søderberg.

A definição das regras e da arquitetura do SE se fundamentou no conhecimento prévio dos engenheiros e operadores do SAF e em trabalhos no estado da arte que contribuíram para relacionar as variáveis de entrada do sistema e os alarmes de saída, inclusive os limites de excursão das funções de pertinência de entrada e saída. Essa é uma etapa indispensável, porém há de se observar alguns pontos sobre como este

tema impacta nos resultados: quanto à estimativa de simetria de pasta, os limites de excursão e as regras demonstraram resultados convergentes com a situação real de alimentação de pasta, não havendo disparidades quanto aos alarmes indicados na saída. A alimentação de pasta ocorre diariamente, mais de uma vez, portanto há padrões bem estabelecidos para definir o volume a ser carregado na coluna e que é de conhecimento mútuo dos operadores do forno.

Já os eventos de segregação e engaiolamento ocorrem com pouca regularidade, pois os operadores sabem o impacto gerado na linha final da produção da ferroliga e por isso, são cuidadosos a fim de evitá-los. Soma-se a este ponto, a falta de padrões registrados desses eventos. Os limites de excursão das funções de pertinência de saída destas variáveis não foram extraídos do conhecimento dos operadores do forno, mas sim de informações coletadas do fornecedor de pasta eletródica da companhia e de trabalhos acadêmicos que investigaram esses fenômenos. Entretanto, estes dados refletem condições ideais que provavelmente diferem da operação do forno. Por exemplo, durante o tempo de aquisição de dados não houve registro de engaiolamento pela companhia, mas a Figura 49 sugere o contrário ao indicar que na aleta 4 há pasta engaiolada.

Desta forma, sugere-se como trabalho futuro estender o tempo de uso da tampa inteligente, com intuito de coletar dados de nível e temperatura durante a ocorrência destes eventos para uma interpretação direcionada às condições de operação do forno. Com isso, as funções de pertinência e até mesmo as regras, relacionadas a estas saídas, podem ser atualizadas com objetivo de deixar o sistema mais assertivo.

Com os pontos colocados acima é necessário relatar que o modelo fenomenológico destas duas anomalias, i.e, segregação e engaiolamento, é custoso de ser obtido em vista do grau de complexidade do sistema SAF e da equipe multidisciplinar necessária para alcançar resultado que seja representativo. Neste cenário, o uso do SE se mostrou como uma alternativa capaz de apresentar tal representatividade, mesmo que haja a necessidade de estender o prazo de coleta de dados para maior compreensão destes fenômenos. De maneira geral, com apenas duas variáveis coletadas, nível e temperatura, consegue-se extrair informações relevantes para a operação do forno. Com a análise mais apurada, a médio ou longo prazo, novas variáveis de processo

podem ser consideradas para o SE que é facilmente adaptável para aumentar ou reduzir a ordem de entradas e saídas.

Na avaliação dos dados de nível registrados, verificou-se que a depender da alimentação de pasta eletródica em formato bloco, pode ocorrer leve deslocamento desse material para o interior de um ou mais vãos entre aletas. Esse evento é indesejado, pois os sensores de nível que monitoram esses vãos, podem medir a superfície do bloco e não de briquete, como esperado. Trata-se de uma inconformidade na medição devido a questões operacionais, porém que em trabalho futuro pode ser contornada, via código, traçando um comparativo da medição retornada de todos os sensores de nível interno e com o histórico de medição. Desta forma será possível rastrear as medidas não conformes e substituí-las pela última medida correta, realizada no intervalo pré-definido. Vale ressaltar que a companhia acolhedora dos testes da tampa tem papel fundamental na determinação da melhor forma para substituir ou descartar dados não conformes. Logo, acolher sugestões proveniente deles, que diferem da sugestão apresentada, é uma prioridade.

Soma-se aos trabalhos futuros, a agregação do SE a um sistema com interface para os operadores. Desta forma, os usuários finais terão acesso ao histórico de medições e às estimativas de riscos potenciais na formação dos eletrodos.

REFERÊNCIAS

AMADI, A. **Modelling and Optimization of Three-phase Submerged Arc Furnaces (SAF)**. 2012. University of South Africa, 2012. Disponível em: <https://uir.unisa.ac.za/bitstream/handle/10500/6588/dissertation_amadi_a.pdf?sequence=1>. Acesso em: 1 fev. 2022.

AMARO, J. P. M.; LIMA, G. M.; BELMONTE, J. A.; LOURENÇO, E. J. Use of Soderberg electrode paste in Briquettes. Em: Infacon IX - The Ninth International Ferroalloys Congress, 2001, Quebec, Canada. [...]. Quebec, Canada: Infacon IX, 2001. p. 486–493.

BERGSTRØM, T.; COWLEY, S.; FOWLER, A. C.; SEWARD, P. E. Segregation of Carbon Paste in a Smelting Electrode. **IMA Journal of Applied Mathematics**, v. 43, n. 1, p. 83–99, 1 jan. 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/imamat/43.1.83>.

BEUKES, J. P.; ROOS, H.; SHOKO, L.; VAN ZYL, P. G.; NEOMAGUS, H. W. J. P.; STRYDOM, C. A.; DAWSON, N. F. The use of thermomechanical analysis to characterise Söderberg electrode paste raw materials. **Minerals Engineering**, v. 46–47, p. 167–176, jun. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687513001210?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jul. 2022.

CASAL-GUISANDE, M.; COMESAÑA-CAMPOS, A.; PEREIRA, A.; BOUZA-RODRÍGUEZ, J.-B.; CERQUEIRO-PEQUEÑO, J. A Decision-Making Methodology Based on Expert Systems Applied to Machining Tools Condition Monitoring. **Mathematics**, v. 10, n. 3, p. 520, 6 fev. 2022.

CHATTERJEE, B. Application of Electrodes in Ferro Alloy Furnaces. **4th Refresher Course on Ferro Alloys**, 1994. Disponível em: <https://eprints.nmlindia.org/5788/>. Acesso em: 1 fev. 2022.

DERNONCOURT, F. Introduction to fuzzy logic. **Massachusetts Institute of Technology**, p. 1–15, 2013. . Acesso em: 14 ago. 2022.

FERBASA. **Nossos Produtos - Ferrocromo Alto Carbono (FeCrAC)**. Disponível em: <http://www.ferbasa.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&conta=45&tipo=56201>. Acesso em: 15 fev. 2022.

FRIEDRICH, B.; KALISCH, M.; FRIEDMANN, D.; DEGEL, R.; KAUSSEN, F.; BÖHLKE, J. The Submerged Arc Furnace (SAF): State-of-the-Art Metal Recovery from Nonferrous Slags. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 4, n. 1, p. 77–94, 11 mar. 2018. Disponível em: <http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/new/images/pages/publikationen/the_submerged_a_id_3531.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2022.

GASIK, M. I. **Handbook of ferroalloys Theory and Technology**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2013. 29–79 p.

GLASTONBURY, R. I.; BEUKES, J. P.; VAN ZYL, P. G.; TANGSTAD, M.; RINGDALEN, E.; DALL, D.; STEENKAMP, J. D.; MUSHWANA, M. Characterisation of

a Real-World Søderberg Electrode. **Metals**, v. 11, n. 1, p. 2–19, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/1/5>. Acesso em: 1 fev. 2022.

HADŽIĆ, M.; FETIĆ, S.; AZIZOVIĆ, E. Application of the expert systems in artificial intelligence. **University journal of Information Technology and Economics**, v. 2, p. 20–23, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283153828_APPLICATION_OF_THE_EX

PERT_SYSTEMS_IN_ARTIFICIAL_INTELLIGENCE>. Acesso em: 27 set. 2022.
HANNESSON, T. **The Si process Drawings**. Disponível em: <https://www.elkem.is/globalassets/iceland/si-process.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2022.

HEUNG-JAE LEE; DEUNG-YONG PARK; BOK-SHIN AHN; YOUNG-MOON PARK; JONG-KEUN PARK; VENKATA, S. S. A fuzzy expert system for the integrated fault diagnosis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 15, n. 2, p. 833–838, abr. 2000. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez120.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=853027>. Acesso em: 28 ago. 2022.

HJORTH, P.; HÖMBERG, D.; ALBADA, S. van. **1st Danish – Norwegian Study Group with Industry (ESGI 137)**. Disponível em: <https://minetworkdotorg.files.wordpress.com/2019/08/esgi-137_report.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2022.

JACCARD, L. R. **Fornos Elétricos a Arco**. Disponível em: <http://www.jaccard.com.br/default.htm>. Acesso em: 1 ago. 2022.

JORDAN, D. T.; HOCKADAY, C. J. Design and control development of a camera-based Söderberg electrode slip measurement device. Em: The thirteenth International Ferroalloys Congress , 2013, Almaty, Kazakhstan. [...]. Almaty, Kazakhstan: 2013. p. 417–426.

KAMILOVA, A. A. **Modelling and analysis of paste flow in high performance Soderberg electrodes**. 2021. University of Oxford, 2021.

KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications**. [s.l.] Prentice-Hall, 1995. 50–94 p.

LARSEN, B.; AMARO, J. P. M.; NASCIMENTO, S. Z.; FIDJE, K.; GRAN, H. Melting and densification of electrode paste briquettes in Søderberg electrodes. Em: Infacon X - Tenth International Ferroalloys Congress, 2004, Cape Town, South Africa. [...]. Cape Town, South Africa: INFACON X: Transformation through Technology, 2004. p. 405–417.

LARSEN, B.; ELKEM CARBON AS. Electrode models for Søderberg electrodes. Em: Proceedings of the Fifth Platinum Conference, 2012, Sun City, South Africa. [...]. Sun City, South Africa: 2012. p. 275–286.

LIN, C.-T.; LEE, C. S. G. **Neural Fuzzy systems A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems**. [s.l: s.n.]1–203 p.

LODWICK, W. A.; JAMISON, K. D. Interval-Valued Probability in the Analysis of Problems Containing a Mixture of Fuzzy, Possibilisitic and Interval Uncertainty. Em: NAFIPS 2006 - 2006 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, 2006, [...]. IEEE, 2006. p. 617–620.

LUCAS, P. J. F.; VAN DER GAAG, L. C. **Principles of Expert Systems**. [s.l.] Addison-Wesley, 1991. 2–30 p.

LÚCIA, M.; DE, A.; LUIZ, A.; DA, M.; CUNHA, S.; TAVARES GANDRA, G. Panorama da indústria mundial de ferroligas. **Banco Nacional de Desenvolvimento**, p. 1–113, 1999. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/3185/2/BS%2010%20Panorama%20da%20Ind%C3%BAstria%20Mundial%20de%20Ferroligas_P.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2022.

MAGNUSSEN, T. E. Basic parameters in the operation and design of submerged arc furnaces, with particular reference to production of high-silicon alloys. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 118, n. 6, p. 631–636, 2018.

MC DOUGALL, I. Ferroalloys Processing Equipment. *Em*: **Handbook of Ferroalloys**. [s.l.] Elsevier, 2013. p. 83–138.

MORKIN CARBON. **Electrode Paste Manufacturer | High-Quality and Affordable | Order Now**. Disponível em: <https://morkincarbon.com/electrode-paste/>. Acesso em: 6 set. 2023.

NAGORI, V.; TRIVEDI, B. Types of Expert System: Comparative Study. **Asian Journal of Computer and Information Systems**, v. 02, n. 02, p. 20–33, abr. 2014. Disponível em: <https://www.ajouronline.com/index.php/AJCIS/article/view/948/568>. Acesso em: 29 ago. 2022.

NATH, P. Electrical aspects of ferro-alloys furnaces. Em: 4th Refresher Course on Ferro Alloys, 1994, [...]. 1994. p. 1701–1716.

NELSON, L. R.; PRINS, F. X. Insights into the influences of paste additions and levels on Söderberg electrode management. Em: Infacon X - Tenth International Ferroalloys Congress, 2004, Cape Town, South Africa. [...]. Cape Town, South Africa: INFACON X: Transformation through Technology, 2004. v. 1, p. 418–431.

RIZHAO HENGQIAO CARBON CO., L. **Soderberg Electrode Paste/Carbon Electrode Paste - China Carbon Electrode Paste and Graphite Electrode Paste**. Disponível em: <https://hengqiaocarbon.en.made-in-china.com/product/sNJQrzgDbFkH/China-Soderberg-Electrode-Paste-Carbon-Electrode-Paste.html>. Acesso em: 6 set. 2023.

ROBERTS; PETE; GOODWILL, J. E. Submerged arc furnaces. **EPRI Center for Materials Production** , 1996. Disponível em: <https://p2infohouse.org/ref/10/09042.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2022.

ROOS, H. **Thermomechanical analysis of raw materials used in the production of Soderberg electrode paste**. 2011. North West University, Potchefstroom, 2011.

Disponível em: <https://repository.nwu.ac.za/handle/10394/7576>. Acesso em: 23 fev. 2022.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2010. 25–73 p.

SADOLLAH, A. Introductory Chapter: Which Membership Function is Appropriate in Fuzzy System? *Em*: **Fuzzy Logic Based in Optimization Methods and Control Systems and its Applications**. [s.l.] InTech, 2018.

SAEVARSDOTTIR, G.; MANOLESCU, P.; MAGNILSSON, T.; SIGURJONSSON, K. Electrodes and control circulating currents in the delta connection, feasibility of skew tapping in the operation of submerged-arc furnaces. Em: The thirteenth International Ferroalloys Congress Efficient technologies in ferroalloy industry , 2013, Almaty, Kazakhstan. [...]. Almaty, Kazakhstan: 2013. p. 443–452.

SAHAJWALLA, V.; DUBIKOVA, M.; KHANNA, R. Reductant characterisation and selection: implications for ferroalloys processing. Em: Tenth International Ferroalloys Congress, 2004, Cape Town, South Africa. [...]. Cape Town, South Africa: INFACON X: 'Transformation through Technology, 2004. p. 352–362.

SCHULTE, R. F. 2017 Minerals Yearbook. **U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK**, p. 2–5, 2017. Disponível em: <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2017-feall.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2022.

SHEFFIELD ASSAY OFFICE. **The Use and Importance of Ferroalloys**. Disponível em: <https://www.assayoffice.co.uk/news/the-use-and-importance-of-ferroalloys>. Acesso em: 23 jul. 2022.

SHOKO, L.; BEUKES, J. P.; STRYDOM, C. A. Determining the baking isotherm temperature of Söderberg electrodes and associated structural changes. **Minerals Engineering**, v. 49, p. 33–39, ago. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/258108995_Determining_the_baking_isotherm_temperature_of_Soderberg_electrodes_and_associated_structural_changes>. Acesso em: 16 fev. 2022.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. [s.l: s.n.]4–56 p.

SINGLA, J.; GROVER, D.; BHANDARI, A. Medical Expert Systems for Diagnosis of Various Diseases. **International Journal of Computer Applications (IJCA)**, v. 93, n. 7, p. 36–43, maio 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jimmy-Singla/publication/271157162_Medical_Expert_Systems_for_Diagnosis_of_Various_Diseases/links/5ad191daaca272fdaf779ffa/Medical-Expert-Systems-for-Diagnosis-of-Various-Diseases.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2022.

SIVANANDAM, S. N.; SUMATHI, S.; DEEPA, S. N. **Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB**. [s.l: s.n.]1–127 p.

SKJELDESTAD, A. **Electrode paste behavior in Søderberg electrodes in ferroalloy production**. 2015. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2015. Disponível em: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2643618>. Acesso em: 23 fev. 2022.

SKJELDESTAD, A.; TANGSTAD, M.; LINDSTAD, L.; LARSEN, B. Temperature profiles in Søderberg electrodes. Em: Proceedings of the Fourteenth International Ferroalloys Congress (INFACON), 2015, Kiev, Ukraine. [...]. Kiev, Ukraine: 2015. p. 327–337.

STEWART, A. B. **An analysis of the electrical circuit of submerged-arc furnaces**. 1980. University of Cape Town , 1980. Disponível em: <https://open.uct.ac.za/bitstream/handle/11427/14048/thesis_ebe_1980_stewart_alistair_bruce.pdf?sequence=1>. Acesso em: 1 ago. 2022.

TAVANA, M.; HAJIPOUR, V. A practical review and taxonomy of fuzzy expert systems: methods and applications. **Benchmarking: An International Journal**, v. 27, n. 1, p. 81–136, 11 set. 2019. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/BIJ-04-2019-0178/full/html>. Acesso em: 30 ago. 2022.

TOIVONEN, L. **A method for measuring the electric quantities of an ac electric-arc furnace**. WO 93/17533. Concessão: 2 set. 1993.

TRAUSTASON, H. G. **Data acquisition of electrical parameters and interpretation of SAF data**. 2020. Reykjavík University, 2020. Disponível em: <https://skemman.is/bitstream/1946/36348/1/Data%20Acquisition%20Of%20Electrical%20Parameters%20And%20Interpretation%20Of%20SAF%20Data.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2022.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **AP-42 SECTION 12.4 - Ferroalloy Production**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch12/bgdocs/b12s04.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2022.

VAN GORDER, R. A.; KAMILOVA, A.; BIRKELAND, R. G.; KRAUSE, A. L. Locating the baking isotherm in a Søderberg electrode: analysis of a moving thermistor model. **SIAM Journal on Applied Mathematics**, v. 81, n. 4, p. 1691–1716, 2021. Disponível em: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:eba7aa4a-7180-4b2f-be48-d7802cf89d99>. Acesso em: 1 fev. 2022.

WANG, L.-X. **A Course in Fuzzy Systems and Control**. USA: Prentice-Hall, Inc., 1996.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965. . Acesso em: 21 ago. 2022.

ZADEH, L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. **Information Sciences**, v. 8, n. 3, p. 199–249, 1975. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/0020025575900365?token=95CBED45CA

7A79AE9D9E6B816998327FCF75129F165AE829619B55CDE22F4ADF75FAB882D1BD3409BBD0DB9CFEE774E9&originRegion=us-east-1&originCreation=20220823190524>. Acesso em: 22 ago. 2022.

ZADEH, L. A. From imprecise to granular probabilities. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 154, n. 3, p. 370–374, set. 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165011405000618>. Acesso em: 21 ago. 2022.

ZHANG, M.; CHEN, Y.; XU, L.; WANG, Y. A Fuzzy Logic System for Carbon Estimation in a Basic Oxygen Furnace. Em: 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2010, [...]. IEEE, 2010. p. 30–33.

ZIMMERMANN, H.-J. Fuzzy set theory. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 2, n. 3, p. 317–332, maio 2010. Disponível em: <https://www.mv.helsinki.fi/home/niskanen/zimmermann_review.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2022.