



UNIVERSIDADE DE UBERABA

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO

MESTRADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MESTRADO PROFISSIONAL

ADELSON GAMA XAVIER

**ANÁLISE COMPARATIVA DA OPERAÇÃO DE UM FORNO DE CAL
COM E SEM CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSO**

UBERABA-MG

2023



ADELSON GAMA XAVIER

**ANÁLISE COMPARATIVA DA OPERAÇÃO DE UM FORNO DE CAL
COM E SEM CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado Profissional em Engenharia Química, da Universidade de Uberaba, como exigência à obtenção do título de Mestre.

Linha de pesquisa: Inovação em Processos Agroindustriais e em Energia Renovável.

Orientador: Professor Drº Antonio Manoel Batista da Silva

UBERABA-MG

2023

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

X19a Xavier, Adelson Gama.
Análise comparativa da operação de um forno de cal com e sem controle avançado de processo / Adelson Gama Xavier. – Uberaba, 2023. 41 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Química. Linha de pesquisa: Inovação em Processos Agroindustriais e em Energia Renovável. Orientador: Prof. Dr. Antônio Manoel Batista da Silva.

1. Indústria de celulose. 2. Lógica difusa. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Silva, Antônio Manoel Batista da. II. Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Química. III. Título.

CDD 661.802

ADELSON GAMA XAVIER

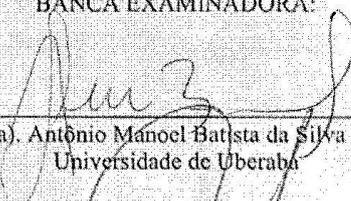
ANÁLISE COMPARATIVA DA OPERAÇÃO DE UM FORNO DE CAL COM
E SEM APC

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Química
do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química - Mestrado Profissional da Universidade de
Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

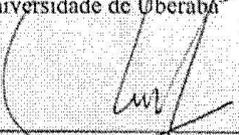
Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos
Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 23/02/2023

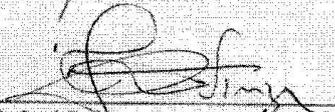
BANCA EXAMINADORA:



Prof(a). Dr(a). Antônio Manoel Batista da Silva - Orientador
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). Antônio de Raulo Peruzzi
Universidade Federal de Uberlândia



Prof(a). Dr(a). José Roberto Delalibera Pinzer
Universidade de Uberaba

DEDICATÓRIA

Ao meu Pai (in memoriam), cuja profissão era pedreiro, que sempre me incentivou a estudar sem medir esforços, mesmo sendo analfabeto e a minha Mãe que era lavadeira e também não mediu esforços para que eu estudasse.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr Antônio Manoel Batista da Silva, orientador, pela paciência e dedicação durante a orientação deste trabalho.

Agradeço aos professores Dr Edilberto Pereira Teixeira e ao professor Dr José Roberto Delalibera Finzer pela paciência e conhecimentos repassados durante as aulas.

Agradeço aos meus colegas do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Química da Universidade de Uberaba pela troca de conhecimentos e amizade.

RESUMO

O setor de extração de celulose apresenta grande relevância na economia do país, alavancado por uma crescente demanda global pelo produto para produção de papel visando suas mais diversas aplicações. Tudo isso impulsiona as indústrias na busca por um processo mais eficiente, rentável e sustentável, o que tem despertado grandes interesses em estudos para otimizações dos processos. Alinhado a essa necessidade, o setor brasileiro de celulose e papel tem buscado alternativas para melhorar a eficiência energética das unidades já existentes, reduzindo em suas matrizes energéticas a utilização de combustíveis fósseis, almejando também otimizar as emissões atmosféricas. Conectado a essas premissas, este trabalho, apresenta uma comparação da operação do forno de cal com e sem um controle avançado de processo baseado em um controlador fuzzy, visando a otimização deste processo no sentido de obter a redução do consumo de gás natural, melhoria no gerenciamento de queima no forno de cal e ganho de estabilidade das variáveis de processo.

Palavras-chave: indústria de celulose; otimização energética; desenvolvimento sustentável, redução de custos, lógica *fuzzy*.

ABSTRACT

The pulp extraction sector is of great importance in the country's economy, leveraged by a growing global demand for the product for paper production, with a view to its most diverse applications. All of this drives industries in the search for a more efficient, profitable and sustainable process, which has aroused great interest in studies for process optimization. Aligned with this need, the Brazilian pulp and paper sector has sought alternatives to improve the energy efficiency of existing units, reducing the use of fossil fuels in their energy matrixes, also aiming to optimize atmospheric emissions. Linked with these premises, this work has as main objective, to demonstrate the energy optimization steps of the lime kiln of a Eucalyptus bleached Kraft pulp industry. The equipment under study is the largest consumer of fossil fuel in the factory and responsible for the third highest variable cost in the organization. This work presents a comparison of the lime kiln with and without an advanced process control based on a fuzzy controller, aiming at the optimization in the sense of obtaining a reduction in the consumption of natural gas, improvement in the management of burning in the kiln and gain of stability of the process variables.

Keywords: cellulose industry; energy optimization; sustainable development, cost reduction, fuzzy logic.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APC- Controle Avançado de Processo

CV- Variável Controlada

EnergiaTotal- Energia a ser entregue ao forno de cal (MJ)

Feedforward (FFs) - Controle antecipatório

FP- Função de pertinência

GN- Gás Natural

IBA- Instituto Brasileiro de Árvores

IDF-Ventilador de tiragem induzida

μ_A - função de pertinência de um conjunto A

MATLAB- *Matrix Laboratory*

MIMO- Multiple-inputs multiple-outputs

MJ- Unidade de medida de energia que representa um milhão de joules

MV-Variável de medida

OPC- *Object Linking Embedding for Process Control*

PID-Proporcional, integral e derivativo

ProdForno- Produção diária do forno de cal (t)

PV- Variável de processo

RPM- Rotações por minuto

SDCD- Sistema Digital de Controle Distribuído

SISO- Single-input single-output

SEnergia- Setpoint de energia específica (MJ/ton de CaO)

SP-Setpoint

TRS-Compostos reduzidos de enxofre

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados do forno de cal em estudo.....	25
Tabela 2- Resultados da média e desvio padrão do residual de oxigênio sem o APC.....	32
Tabela 3- Resultados da média e desvio padrão do residual de oxigênio com o APC.....	32
Tabela 04- Resultados da média e desvio padrão do consumo de gás natural sem o APC.....	33
Tabela 05- Resultados da média e desvio padrão do consumo de gás natural com o APC.....	33
Tabela 06- Resultados da média e desvio padrão da energia sem o APC.....	34
Tabela 07- Resultados da média e desvio padrão da energia com o APC.....	34
Tabela 08- Resultados da média e desvio padrão do residual de carbonato de cálcio sem o APC.....	34
Tabela 09- Resultados da média e desvio padrão do residual de carbonato de cálcio com o APC.....	35
Tabela 10- Resultados da média e desvio padrão do TRS sem o APC.....	35
Tabela 11- Resultados da média e desvio padrão do TRS com o APC.....	35
Tabela 12- Tarifa de fornecimento de gás natural no segmento industrias-Mercado Cativo.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Visão geral do ciclo de recuperação <i>kraft</i>	5
Figura 2- O ciclo da cal.....	6
Figura 3- Estágios dentro do forno de cal na indústria de celulose.....	9
Figura 4- Perfil de temperatura dentro do forno de cal da indústria de celulose.....	10
Figura 5- Lógica booleana (a) e lógica <i>fuzzy</i> (b).....	13
Figura 6- Variáveis linguísticas.....	15
Figura 7- Funções de pertinência.....	17
Figura 8- Funções de pertinência: (a) Triangular, (b) Trapezoidal (c) Sigmoidal (d) Função de Bell.....	17
Figura 9- Controlador Fuzzy.....	20
Figura 10- Forno de Cal. Montes del Plata S.A., Uruguay.....	25
Figura 11- Sistema de controle <i>Fuzzy</i>	30
Figura 12- Possibilidades das funções de pertinência para a criação da base de regras.....	31
Figura 13- Base de regras de implicação para o controle de <i>setpoint</i> de saída.....	31
Figura 14- Concentração de Oxigênio.....	32
Figura 15- Consumo de energia em MJ/t de CaO.....	33
Figura 16- Carbonato residual em %.....	34
Figura 17- TRS em mg/Nm ³	35

SÚMARIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
2.1 Objetivos específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Eficiência energética	4
3.2 Processo <i>Kraft</i>	4
3.3 Unidade de recuperação do licor preto	5
3.4 O Forno de Cal.....	7
3.4.1 Eficiência energética do forno de cal.....	8
3.4.2 Método Tradicional de Controle dos Fornos de Cal	10
3.5 Controle Avançado de Processo (APC)	11
3.6 Lógica <i>Fuzzy</i>	12
3.6.1 Conjuntos <i>Fuzzy</i>	12
3.6.2 Sistema de inferência <i>Fuzzy</i>	14
3.6.3 Variáveis linguísticas	15
3.6.4 Função de Pertinência.....	16
3.6.6 Fuzzificação	18
3.6.7 Defuzzificação	19
3.6.8 Controladores <i>fuzzy</i>	19
4. METODOLOGIA	23
4.1 Dados numéricos	23
4.2 Softwares	23
5. MÉTODOS	24
5.1 Estudo do forno de cal	24
5.2 Definição das variáveis de entrada e saída.....	25
5.3 Definição das restrições do controlador	26
5.4 Definição das regras de controle junto aos especialistas	26
5.5 Implementação do controlador proposto e análise os resultados.....	26

5.6	Considerações sobre o emprego do sistema de controle avançado aplicado ao forno de cal em estudo.....	26
5.6.1	Controle da concentração de Oxigênio	28
5.6.2	Controle de temperatura dos gases	28
5.6.3	Controle de Energia do Forno de Cal.....	29
5.6.4	Controlador <i>Fuzzy</i>	29
5.6	Regras de Implicação.....	30
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
7	CONCLUSÃO	37
9	REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

A indústria de extração de celulose é de suma relevância para a economia do Brasil. Em 2020, o país classificou-se como o segundo maior produtor mundial de celulose, atrás apenas dos Estados Unidos da América (EUA). Considerando o processo químico foram produzidas 21 milhões de toneladas do produto, levando em consideração tanto a fibra curta como a fibra longa e a pasta de alto rendimento. Isso equivale a um crescimento de 6,4% frente a 2019 (IBÁ 2021).

As polpas de eucalipto são as principais matérias-primas utilizadas para fabricação do papel, que se encontra em uma demanda mundial crescente, principalmente na categoria do *tissue* (produtos fabricados com baixa gramatura, como papel higiênico, toalhas de cozinha, lenços de papel, papel facial, guardanapos, toalhas), destinado para a produção de produtos de higiene pessoal e à limpeza doméstica. Isso tem alavancado o setor de celulose, na qual, a busca por um processo mais eficiente e rentável, tem despertado grandes interesses em estudos para otimizações neste setor.

Segundo Ehrenfeld (2001) o desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento conduzido responsavelmente por indivíduos, empresas, governos e outras instituições, cuidando do futuro como se ele lhes pertencesse, dividindo e partilhando equitativamente os recursos naturais dos quais os seres humanos e as demais espécies dependem, de forma a garantir que aqueles que hoje existem estejam presentes também no futuro para satisfazer as necessidades e aspirações humanas. IPPC (2000), Høglund (1999), Axegard (1997) e Springer (1993) apresentam que a otimização de processos vem sendo uma das principais escolhas para melhoria do custo e do rendimento no campo operacional de uma fábrica de celulose.

Imerso à um mercado repleto de fortes concorrentes e novos projetos surgindo com tecnologias inovadoras, já alinhadas ao conceito da indústria 4.0, manter-se competitivo acaba por se tornar um imenso desafio, sendo imprescindível uma alta eficiência operacional, com baixo custo e desenvolvimento sustentável.

Aliado à necessidade de tornar o processo mais eficiente, juntamente com a grande pressão exercida pelos órgãos ambientais mundiais, no que tange a redução no consumo de combustíveis de fontes não renováveis, encontra-se neste trabalho uma

excelente oportunidade para otimizar o custo da unidade e minimizar os impactos ambientais causados pelo consumo de combustível fóssil.

Diante deste panorama, o setor brasileiro de celulose e papel tem buscado alternativas para melhoria da eficiência energética, reduzindo a dependência de combustíveis de origem fóssil em sua matriz energética. Dentro desse setor, segundo dados do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2018), cerca de 85,5% da matriz energética é proveniente de fonte de energia de origem renovável, composta pelo licor preto *Kraft* e biomassa residual, e os principais produtos fósseis são o gás natural equivalentes a 8,7%, o óleo combustível correspondendo a 4% e outros, como o óleo diesel e o carvão mineral com 2% do total.

Dentro da matriz energética da produção de polpa celulósica, o forno de cal ganha destaque, por ser o maior consumidor de combustível fóssil e o terceiro maior custo variável, perdendo apenas para os custos com madeira e produtos químicos utilizados nas etapas de branqueamento da polpa (TRAN, 2012)

2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é comparar a operação de um forno de cal de uma indústria de polpa de celulose *Kraft* branqueada de Eucalipto, sem e com a presença do controle avançado de processo, isto visando a otimização no sentido de obter a redução do consumo de gás natural, melhoria no gerenciamento de queima no forno e ganho de estabilidade das variáveis de processo.

2.1 Objetivos específicos

Como objetivo específico, esse trabalho aborda a implementação de controles avançados e a redução do consumo de gás natural. Dessa forma envolve os seguintes itens:

- Estudo do funcionamento do forno de cal
- Definição das variáveis de entrada e saída
- Definição das restrições do controlador
- Definição das regras de controle junto aos especialistas
- Determinação da forma de implementar o controlador para a planta
- Implementação do controlador e análise dos resultados

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados conceitos básicos para a realização deste trabalho, envolvendo a contextualização da etapa de calcinação, passando pela teoria básica de controle e os equipamentos da calcinação.

3.1 Eficiência energética

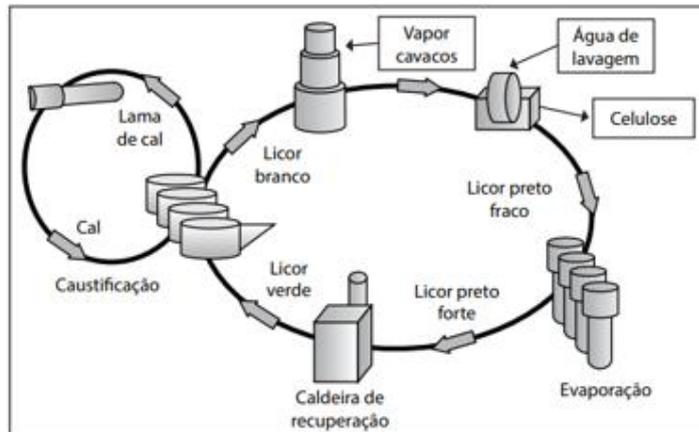
Eficiência energética significa gerar a mesma quantidade com menos recursos naturais ou realizar o mesmo trabalho com menos energia (EPE, 2022). Trata da relação entre a quantidade de energia consumida por determinado equipamento ou aparelho e a quantidade de energia efetivamente utilizada por ele para realizar a tarefa a que se propõe (INFOESCOLA, 2022).

3.2 Processo *Kraft*

A madeira é composta de celulose, hemiceluloses e lignina e é a principal matéria prima na fabricação de papel e celulose (CARVALHO et al., 2009). Os processos de separação das frações lignocelulósicas, modificam os materiais lignocelulósicos pelo rompimento da estrutura da parede celular da biomassa vegetal, removendo, solubilizando ou despolimerizando a lignina. O tipo de processo depende do material utilizado e da finalidade proposta de utilização das frações lignocelulósicas, podendo ser classificados em: mecânico, físico, biotecnológicos e químicos, dentre destes processos de separação da celulose, o mais utilizado atualmente, em torno de 95%, é o processo químico sulfato, denominado "*Kraft*". Esse processo ocorre em meio alcalino à base de sulfeto de sódio (Na_2S) e de hidróxido de sódio (NaOH). Em uma fábrica de produção de celulose *Kraft*, pode-se observar a divisão de duas unidades principais de processamento. A primeira é responsável por se obter a polpa celulósica e a segunda se propõe à recuperação de compostos químicos e ao gerenciamento das utilidades no processo. Conforme pode-se observar na Figura 1, os propósitos dessas unidades são: recuperar os compostos para se obter

o licor branco (Na_2S e NaOH), fornecer água, vapor, energia elétrica e ar comprimido para o processo, além de tratar os efluentes (ALMEIDA, 2006).

Figura 1 – Visão geral do ciclo de recuperação *Kraft*



Fonte: FIGUEREDO, 2009.

Os cavacos de madeira com aproximadamente 2 cm de tamanho e esfericidade de 0,2cm, de acordo com Souza-Santos (2010), alimentam continuamente o digestor onde são aquecidos com o licor de cozimento. Este licor é constituído por licor branco e por licor preto fraco proveniente da etapa de lavagem (CARDOSO, 1998). O digestor funciona como um vaso de pressão, onde os cavacos e o licor atravessam zonas de temperaturas crescentes até atingir a zona de cozimento. A partir deste ponto, a temperatura é mantida constante (FERREIRA, 2007). Após o cozimento, obtém-se a polpa de celulose como produto final, impregnada de licor residual, denominado licor preto fraco. Este licor contém cerca de 13 a 17% de sólidos dissolvidos e segue para a unidade de recuperação. Por sua vez, a polpa de celulose é lavada e segue para as etapas de branqueamento, secagem e expedição (FERREIRA, 2007).

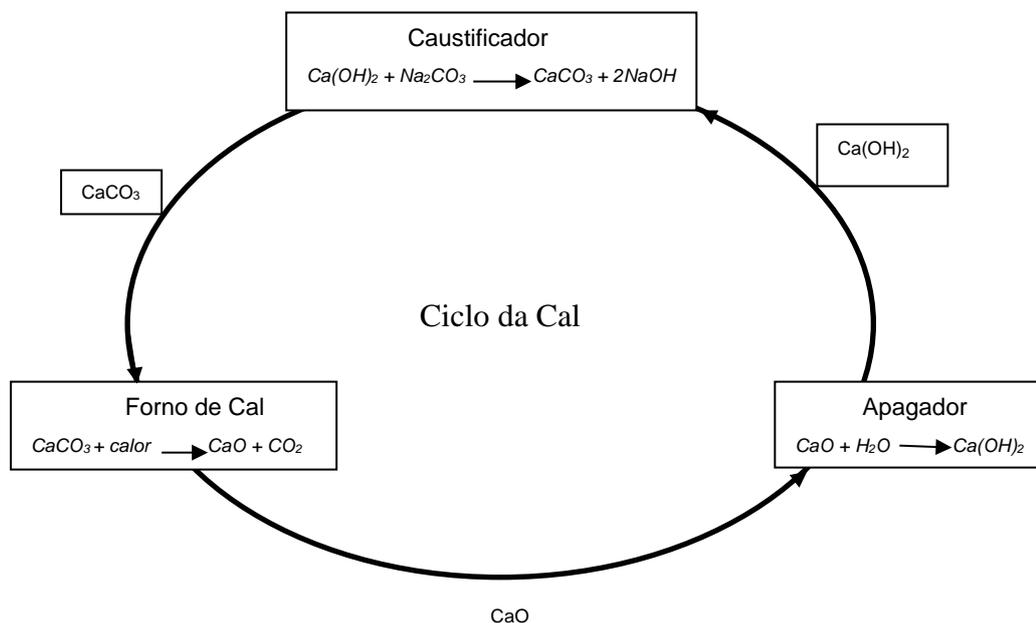
3.3 Unidade de recuperação do licor preto

De acordo com Cardoso (1998), no processo *Kraft*, a etapa de recuperação do licor preto é uma das partes essenciais e tem como objetivos:

1. Recuperar os compostos inorgânicos na forma de licor branco para ser reutilizado no digestor – ciclo do sódio e ciclo do cálcio – minimizando perdas;
2. Gerar energia elétrica e vapor superaquecido para o processo, minimizando custos.

No ciclo do sódio, o licor preto fraco é concentrado em evaporadores de múltiplos efeitos até uma concentração em torno de 65 a 80% de sólidos, transformando-se em licor preto forte, e depois queimado na caldeira de recuperação. O material orgânico é queimado e o inorgânico é fundido devido a temperatura da combustão, separado, dissolvido em solução aquosa, clarificado e filtrado, formando assim o licor verde. O licor verde é composto por carbonato e sulfeto de sódio (Na_2CO_3 e Na_2S) e recebe a cal (CaO), quando ocorre o apagamento ou extinção da cal (*slaking*), para depois converter carbonato de sódio, Na_2CO_3 , em hidróxido de sódio, NaOH , na etapa de caustificação (GEORGALLIS, 2004). Esse processo de recuperação contém dois ciclos básicos: o ciclo de recuperação do sódio e o ciclo de recuperação do cálcio. O processo *Kraft* pode ser considerado um processo cíclico por causa da interação entre essas duas unidades (FERREIRA, 2007). Neste trabalho, o foco é no forno de cal que se encontra no ciclo do cálcio, conforme ilustrado pela Figura 2.

Figura 2 - O ciclo da Cal



Fonte: Adaptado de LUNDQVIST, 2009.

No ciclo de recuperação do cálcio, fornos de cal são utilizados para reconverter a lama de carbonato de cálcio em óxido de cálcio para ser reutilizado na etapa de caustificação (GEORGALLIS, 2004). Essa reação, chamada de calcinação e descrita pela equação 1, acontece em altas temperaturas (815°C ou mais). Neste equipamento

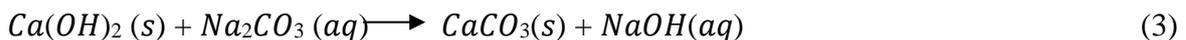
ocorre a reação de calcinação e a transferência de calor entre os gases e o material fundido, que está sendo reagido (VENKATESH, 1992).



Na etapa de caustificação, ocorrem duas reações, que foram separadas em duas etapas no ciclo da Figura 2 e representadas pela Equação 2 e pela Equação 3.

No primeiro momento ocorre a extinção da cal em um tanque com agitador, chamado de extintor ou apagador. O CaO reage com a água presente no licor verde, tornando-se hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂. Em seguida, a segunda reação ocorre no tanque extintor e continua em reatores com agitadores, chamados de caustificadores e dispostos normalmente em série, no qual o Ca(OH)₂ reage com o carbonato de sódio, Na₂CO₃, produzindo o carbonato de cálcio, CaCO₃, e o hidróxido de sódio, NaOH.

Apesar das reações serem separadas em reatores com nomenclaturas diferentes, no primeiro reator ocorre tanto a reação da Equação (2) quanto a Equação (3) (VENKATESH, 1992).



O hidróxido de sódio segue no processo para compor o licor de cozimento no digestor, que é a primeira etapa de separação da celulose. O material restante compõe uma lama que decanta em um silo. Logo após a retirada, esta é lavada para seguir no processo, sendo reenviada com 75 a 80% de sólidos para o forno de cal; fechando-se o ciclo do cálcio.

3.4 O Forno de Cal

O forno de cal, tem por finalidade converter carbonato de cálcio em óxido de cálcio por meio da adição de calor a uma determinada temperatura. (Kramm,1979).

Naturalmente, espera-se obter uma boa conversão com o menor consumo possível de combustível, visando obter a maior eficiência possível. A eficiência

energética de um forno de cal pode ser descrita pela taxa de calor. A taxa de calor é a quantidade de energia que é consumida para criar uma certa quantidade de cal requeimada.

Normalmente, isso é expresso como MJ/t CaO. Para a maioria dos fornos de cal, a taxa de calor está entre 6 a 9 MJ/Kg CaO. (NORBOM,1985)



De acordo com Lundqvist (2009) a maneira mais comum de se fazer a calcinação é utilizando um forno rotativo de cal. A lama de cal entra no final do nível mais alto do forno (alimentação) e é transportada para o nível mais baixo (descarga) por intermédio da rotação e da inclinação do equipamento. Ao longo do forno, a lama é aquecida pelos gases quentes da combustão que se movem em contracorrente ao movimento do sólido.

3.4.1 Eficiência energética do forno de cal

A energia que entra em um forno pode ser transferida para três direções (GRACE et al., 1989):

1. Para os sólidos;
2. Para fora do invólucro do forno (casca) – perdas pela parede;
3. Para fora do forno junto com os gases de combustão na entrada de lama.

A energia transferida para os sólidos é usada para o aquecimento, secagem e calcinação da lama de cal. A energia necessária para a calcinação é relativamente constante e difícil de influenciar, pois se trata de uma reação endotérmica em que, ao atingir a temperatura de reação, toda a energia transferida é usada na transformação mantendo essa reação praticamente isotérmica. Por outro lado, a energia para a secagem depende da umidade contida da lama de cal. Uma separação eficiente da lama do licor branco resulta em material mais seco na alimentação, sendo, portanto, crucial para a eficiência energética do forno (LUNDQVIST, 2009).

A cal quente deixa o forno através de orifícios na extremidade da descarga, que são os resfriadores de cal, onde se pré-aquece o ar de combustão entre 260-370°C. A cal, assim, deixa o forno com uma temperatura entre 200-300°C, em vez de cerca de 1100°C, reduzindo a quantidade de energia que tem de ser fornecida para o processo (HOUGH, 1985).

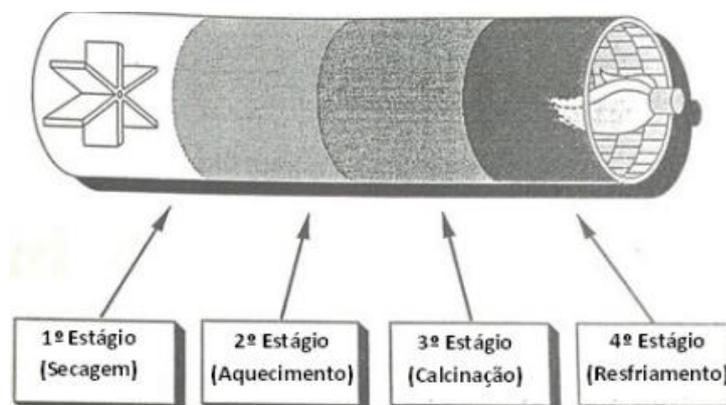
A quantidade de energia perdida pelo casco vai depender do tamanho, perfil de temperatura e isolamento do forno. Tratando de eficiência energética, o isolamento é a parte mais óbvia para minimizar este tipo de perda de calor. Esse problema pode ser minimizado através de um revestimento refratário com tijolos duplos (GRACE, 1989). Em um forno de cal, as perdas de calor pelo casco estão entre 10-15% do total da energia (NORBOM, 1985).

O forno de cal pode ser dividido em seções ou estágios, conforme pode ser observado nas Figura 3 e 4, nas quais ocorrem as etapas de calcinação (LUNDQVIST, 2009):

1. A secagem da lama de carbonato de cálcio acontece no primeiro estágio;
2. No segundo estágio, a lama é aquecida até atingir a temperatura de calcinação (em torno de 850°C);
3. A calcinação do CaCO_3 ocorre no terceiro estágio e os sólidos permanecem na temperatura de calcinação até que todo o CO_2 seja retirado da partícula.
4. A sinterização da cal e o resfriamento acontecem no quarto e último estágio.

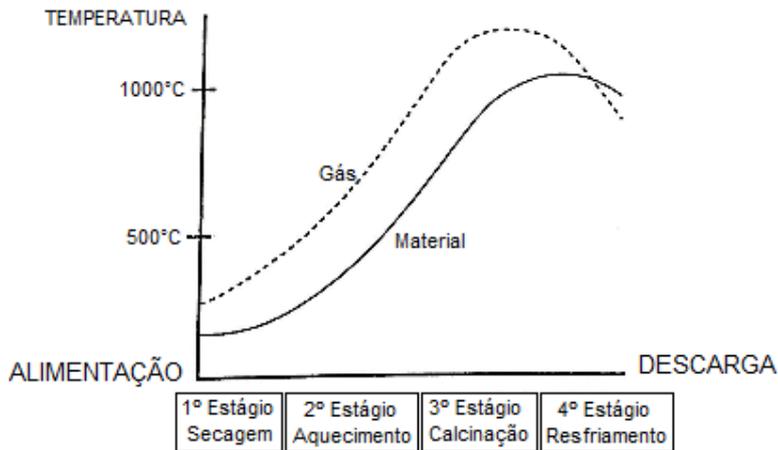
Quando os particulados de cal são aquecidos por mais tempo, as partículas se aglomeram, formando assim partículas maiores e permitindo o resfriamento

Figura 3- Estágios dentro do forno de cal na indústria de celulose



Fonte: VENKATESH, 1992

Figura 4- Perfil de temperatura dentro do forno de cal da indústria de celulose



Fonte: VENKATESH, 1992

O posicionamento de zonas diferentes dentro do forno é muito importante para a qualidade da cal. Se a zona de sinterização for muito longa, há o risco de queimar a cal (*overburning*) e reduzir a quantidade disponível do produto. Por outro lado, se a zona de sinterização for muito pequena resulta na saída da cal como particulados em conjunto com o gás, pois esta não terá tempo de residência suficiente para formar os pellets (pelotas). Logo, o tempo de residência do material tem que ser programado para atender um produto que é reativo na caustificação e manejável (TRAN, 2000).

A eficiência energética e um forno de cal pode ser descrita pela taxa de calor, que pode ser definida como a quantidade de energia que é consumida para produzir uma certa quantidade de cal. Para um forno de cal eficiente, a quantidade de energia térmica é cerca de 6,276 MJ/Kg de CaO ou 6.276MJ/t de CaO (NORBOM, 1985).

3.4.2 Método Tradicional de Controle dos Fornos de Cal

O método de controle de calor para os fornos era simples e dependente da ação manual dos operadores. O ponto de ajuste de calor para o forno era definido em megajoule (MJ). De acordo com as mudanças no processo como alteração da vazão de alimentação de lama, carbonato residual da saída do forno, variações de temperatura na zona de queima, gases de combustão ou no filtro de lama. O operador definia, baseado em critérios pessoais a quantidade total de calor dos fornos em MJ. (CASTRO & FIGUEREDO, 2012).

Algumas estratégias de controle trabalhavam em automático, operando em cascata com algumas variáveis de processo:

- 1- Variação da velocidade IDF em cascata com o excesso de oxigênio nos gases de combustão na saída do forno;
- 2- Variação da velocidade da rosca de alimentação de lama em cascata com a temperatura dos gases de combustão do forno.

3.5 Controle Avançado de Processo (APC)

O Controle Avançado de Processo (APC, da sigla em inglês) auxilia o operador de processos na operação da unidade industrial sob condições ótimas. O APC alcança esta meta operando em conjunto com o sistema de controle regulatório. Por este motivo, torna-se essencial que, tanto a instrumentação de processo como as malhas de controle regulatório estejam em boas condições de funcionamento para que o APC atue apropriadamente (SIMSCIESCOR 2005). Os controladores convencionais (PID) não são capazes de prover soluções para todo tipo de sistema. Em muitos casos a complexidade do sistema é grande, apresentando variação no tempo, tempo morto elevado, não-linearidades, dinâmica variante no tempo, dentre outros itens característicos dos sistemas de controle instalados em sistemas industriais. Neste cenário, tenta-se normalmente aproximar o comportamento do sistema por um modelo de sistema linear para aplicação de PIDs, com prejuízo de desempenho do sistema em malha fechada (REZNIK, 2000). Surge em função disso, a necessidade e interesse em controladores adaptativos, que buscam determinar os parâmetros a partir da identificação das características dos sistemas que se deseja controlar. Dentre as alternativas existentes estão os controladores nebulosos, neurais, neurofuzzy e outras técnicas clássicas baseadas em modelos determinísticos e estocásticos.

Os benefícios que podem ser obtidos com o uso de Controle Avançado em uma planta industrial estão sempre relacionados a reduzir a variabilidade de uma variável economicamente importante, chamada de variável crítica, e deslocar seu valor médio (“*set-point*”) mais próximo aos valores de especificações e limitações impostos pelo processo. De forma geral, pode-se sempre relacionar uma redução de variabilidade e aproximação do valor médio de uma variável crítica aos limites do processo com fatores econômicos da planta que pode ser tipicamente um ou mais dos seguintes: (1)

aumento na capacidade de produção; (2) aumento no rendimento de produtos; (3) redução de perdas; (4) redução no consumo de energia; (5) redução no consumo de produtos químicos; (6) redução do custo operacional; (7) melhor qualidade dos produtos, (8) garantir que o sistema esteja trabalhando com máxima performance em direção à mesma meta. Dessa forma, todos os recursos criam valor agregado, os equipamentos de controle de processo são mantidos em um estado ideal para o melhor desempenho e o produto final é produzido a custo mínimo.

3.6 Lógica *Fuzzy*

Em meados da década de 60, o professor L.A. Zadeh, da Universidade de Berkeley, USA, considerava limitada a teoria usual, baseada na lógica booleana, para enfrentar fenômenos cotidianos. Os sistemas especialistas que lhe interessava implementar eram softwares interativos, capazes de tomar algumas decisões próprias, sustentadas na teoria usual de conjuntos, que admitia apenas decisões binárias, não sendo possível utilizá-los satisfatoriamente para abranger todas as decisões da mente humana (BILOBROVEC, 2005).

3.6.1 Conjuntos *Fuzzy*

Na teoria clássica de conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto é bem definido, de maneira que para um conjunto A em um universo U , um elemento simplesmente pertence ou não pertence àquele conjunto, como se mostra na seguinte função característica:

$$\mu_A(x): U \rightarrow \{0, 1\}$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases} \quad (5)$$

Em um sentido mais amplo, Zadeh (1965) propôs a generalização da função característica, de modo que ela possa assumir infinitos valores no intervalo $[0, 1]$. Um conjunto *fuzzy* A em um universo U é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x)$:

$U \rightarrow [0, 1]$, e representado por um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\} \quad (6)$$

Onde:

$\mu_A(x)$: representa o grau de pertinência de x com o conjunto A

A : Conjunto *fuzzy*;

x : A variável de interesse.

U : Universo de discurso.

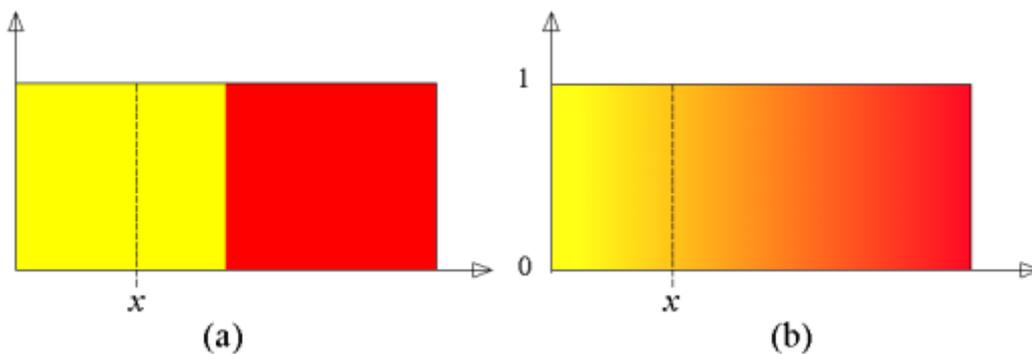
$\mu_A(x)=1$ indica que x é completamente compatível com A ;

$\mu_A(x)=0$ indica que x é completamente incompatível com A ;

$0 < \mu_A(x) < 1$ indica que x é parcialmente compatível a A , com grau $\mu_A(x)$.

Além disso, um elemento pode pertencer a mais de um conjunto *fuzzy*, com diferente grau de pertinência. Na Figura 5 observa-se que se um elemento x for movido em direção aos limites do conjunto A (cor amarela), no ponto de cruzamento ocorrerá repentinamente um degrau no comportamento de sua pertinência, inicialmente de membro para não membro. Também, o grau de pertinência nos limites é indeterminado.

Figura 5-Lógica booleana (a) e lógica *fuzzy* (b)



Fonte: Sanchez, E.C.M, 2009

Por outro lado, a lógica *fuzzy* pode perceber as variações ocorridas nos pontos de transição de uma cor para outra. Os conjuntos (faixa de cores) são facilmente representáveis por meio da linguagem *fuzzy* (Figura 4 b). As funções de pertinência *fuzzy* podem representar a variação gradual nas tonalidades. Por exemplo, o mesmo

elemento x possui um grau de pertinência 0,8 na função de pertinência de cor amarela, e grau de pertinência 0,2 na função de cor vermelha. Na Figura 4 o eixo “X” representa o universo de discurso do elemento x e o eixo “Y” representa o grau de pertinência definido entre 0 e 1.

Neste momento, é importante definir o conceito de grau de pertinência. Ele é definido por um número no intervalo de $[0,1]$ que determina “quanto” uma variável pertence a um determinado conjunto. Na lógica booleana, somente existem dois graus de pertinência: 0% se não pertence e 100% se pertence ao conjunto. No entanto, na lógica *fuzzy* existe uma faixa de valores entre 0% e 100%.

Notação do conjunto *Fuzzy*

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in U\} \quad (7)$$

$$A = \frac{(\mu_A(x), x \in U)}{X} \quad (8)$$

3.6.2 Sistema de inferência *Fuzzy*

O raciocínio humano executa conexões entre causas e efeitos, ou entre condições e consequência, ao resolver problemas ou tomar decisões. Essas implicações lógicas do cérebro humano são trazidas pela lógica *fuzzy* na forma de regras de inferência, elaboradas com o número e conjuntos *fuzzy*:

$$\text{Se } \langle \text{condição} = A \rangle \text{ Então } \langle \text{ação} = B \rangle \quad (9)$$

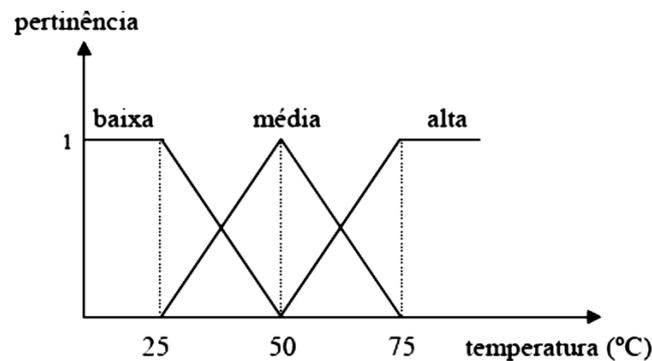
As inferências que modelam as relações entre variáveis de entrada (condições) e de saída (ação) formam a base de regras do processo a ser controlado (FELICIANO, 2013).

3.6.3 Variáveis linguísticas

A variável linguística é uma variável que possui valores que não são números, mas sim palavras ou frases na linguagem natural. Elas são os nomes dos conjuntos *fuzzy*, os quais são representados por meio de funções de pertinência.

Por exemplo, a temperatura de um determinado processo pode ser uma variável linguística, assumindo valores: baixa, média e alta, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6- Variáveis linguísticas



Fonte: (TANSCHKEIT, 2003)

A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais (TANSCHKEIT, 2003).

As variáveis linguísticas têm a função de fornecer uma forma sistemática para as descrições aproximadas dos fenômenos complexos ou mal definidos, utilizando um tipo de descrição linguística similar ao empregado pelos seres humanos. Isto permite o tratamento de sistemas muito complexos para serem analisados por meio de cálculos matemáticos.

Generalizando, as variáveis linguísticas podem ser sentenças com um formato de linguagem padrão ou especificada pelo usuário, construídas a partir de termos primários (alto, baixo, pequeno, médio, grande), de modificadores (muito, pouco,

levemente), de delimitadores (acima, abaixo, ao lado) e conectores lógicos (não, e, e ou). Uma variável linguística é formalmente caracterizada pela quintupla (N, T(N), U, G, M), onde:

N- Nome da variável

T(N)- conjunto de nomes dos valores linguísticos de N

U- Universo de discurso

G- Regra sintática para gerar os valores de N como uma composição de termos de T(N), conectivos lógicos, modificadores e delimitadores

M- Regra semântica, para associar a cada valor gerado por G um conjunto *fuzzy* em U.

No caso da variável temperatura da Figura 5, tem-se:

N- temperatura

T(N)- {baixa, média, alta}

U- 0 a 100°C

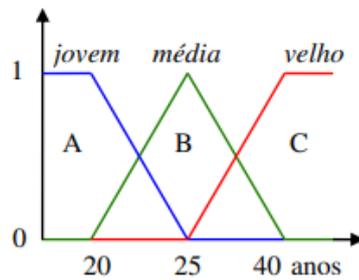
G- temperatura não baixa e não muito alta

M- associa o valor G a um conjunto *fuzzy* cuja função de pertinência exprime o seu significado.

3.6.4 Função de Pertinência

A função de pertinência (FP) é uma função numérica que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso. Estas funções de pertinência podem ter diferentes formas, as quais dependem do critério utilizado pelo especialista para representar o contexto em que serão utilizadas. Por exemplo, considere-se a variável linguística idade (de pessoas), constituídas pelos termos linguísticos, $T(\text{idade})=\{\text{jovem, média, velho}\}$ correspondentes aos conjuntos *fuzzy* A, B e C, e cada uma definido por uma função de pertinência (Sanchez, E.C.M, 2009). Uma possível representação das funções de pertinência é mostrada na Figura 7.

Figura 7- Funções de pertinência

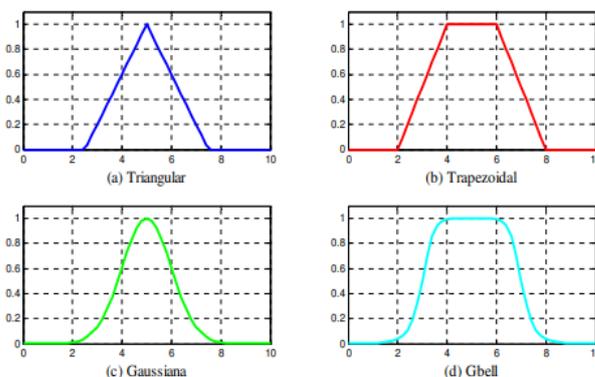


Fonte: Sanchez, E.C.M, 2009

Na Figura 7 a idade até 20 anos apresenta um grau de pertinência igual a 1 no conjunto A, à medida que a idade aumenta o grau de pertinência neste conjunto decresce; para uma idade de 25 anos é totalmente incompatível no conjunto A e compatível no conjunto B, e uma idade acima de 40 anos apresenta grau de pertinência diferente de 0 em C.

Observe-se que, na Figura 8, o contexto é importante na definição das funções de pertinência e de sua distribuição ao longo de seu universo de discurso, as quais são determinadas pelas noções que podem ter diferentes pessoas do contexto. Além disso a forma (triangular, trapezoidal, gaussiana, etc) das funções de pertinência pode ser definida baseada na experiência e perspectiva do especialista. Na prática, as formas selecionadas podem ser alteradas em função dos resultados obtidos.

Figura 8. Funções de pertinência: (a) Triangular, (b) Trapezoidal (c) Sigmoidal (d) Função de Bell



Fonte: Sanchez, E.C.M, 2009

Algumas recomendações práticas podem ser mencionadas:

- O número de funções de pertinência por variável deve estar entre 2 e 7

Com maior número de conjuntos, se tem uma maior precisão, mas a demanda computacional também é maior; e para valores muito maiores, não há melhorias significativas.

- Os formatos mais frequentes encontrados são os triangulares e trapezoidais, pela facilidade de serem gerados. Em aplicações nas quais se requer um desempenho suave de importância crítica, podem ser usadas funções tipo sigmóides e spline.

- Outro fator que afeta a precisão é o grau de superposição das funções de pertinência; experimentalmente foram determinados como adequados valores na faixa de 25% até 75%.

3.6.6 Fuzzificação

Para Malvezzi (2010), o processo de fuzzificação consiste em mapear informações exatas e relevantes para a composição dos chamados conjuntos nebulosos, nas quais determinadas regras serão utilizadas dependendo da circunstância de sua aplicação. Seria como tornar valores numéricos de entrada e trazê-los para o formato de conjuntos *fuzzy*.

“Essa etapa fornece parâmetros *fuzzy* a uma máquina de inferência que processa uma série de regras do tipo SE-ENTÃO, constituída de proposições, envolvendo termos de variáveis linguísticas” (MACHADO, 2016). Neste processo são realizadas as seguintes determinações:

- analisar o problema
- definir quais são as variáveis utilizadas
- determinar as funções de pertinência (FP)
- criar as regiões

Com o intuito de facilitar a modelagem computacional na obtenção de valores gerados da fuzzificação, deve-se gerar a menor quantidade possível de funções de pertinência e que possuam representação matemática que auxiliem na sua implementação. (MARQUES, 2016)

3.6.7 Defuzzificação

O que foi gerado pela inferência *fuzzy*, fuzzificação, base de regras, tornam-se valores que são atribuídos às variáveis de saída do sistema. De uma forma análoga, é o mesmo que realizar o inverso da fuzzificação, é transformar os valores obtidos em resultados considerados clássicos. A defuzzificação é onde ocorre a chamada interpretação do sistema, ou seja, tudo aquilo que foi obtido por meio de variáveis de entrada e funções de pertinência, é novamente convertido a valores numéricos com o intuito de aplicar o que foi gerado (MALVEZZI, 2010). Neste processo, acontece a transformação de dados de saída que ainda se encontram presentes no domínio *fuzzy*, para o conjunto dos números reais, tornando esses valores com uma melhor representatividade na composição das possibilidades.

3.6.8 Controladores *fuzzy*

Ao contrário dos controladores convencionais em que o algoritmo de controle é descrito analiticamente por equações algébricas ou diferenciais, através de um modelo matemático, no controle *fuzzy* utilizam-se regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever numa rotina a experiência humana, intuição e heurística para controlar um processo (ZADEH, 1965).

Em geral o processo segue os seguintes passos:

- especifica-se as variáveis de entrada e saída utilizadas;
- define-se o conjunto de regras;
- determina-se o método de defuzzificação;
- realiza-se testes para a verificação do sistema, ajustando os detalhes conforme o propósito inicial.

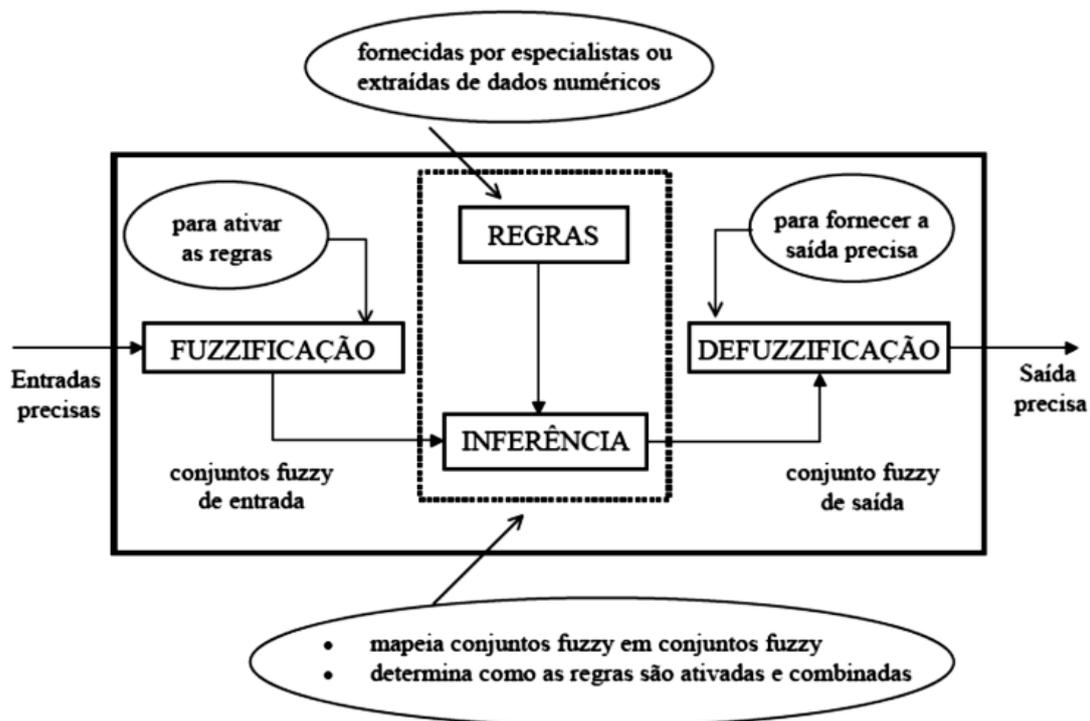
Os controladores *fuzzy* são robustos e de grande adaptabilidade, incorporando conhecimento que outros sistemas nem sempre conseguem acomodar (GUERRA, 1998).

Também são versáteis, principalmente quando o modelo físico é complexo e de difícil representação matemática. Além disso, mesmo em sistemas onde a

incerteza se faz presente de maneira intrínseca, agregam uma robustez característica (BRITO, Thiago. S. P, 2015).

Um controlador *fuzzy* é mostrado na Figura 9, na qual são identificadas as funções de cada bloco.

Figura 9. Controlador *fuzzy*



Fonte: (TANSCHKEIT, 2003)

Neste sistema de inferência *fuzzy*, consideram-se entradas não-*fuzzy*, ou precisas – resultantes de medições ou observações (conjuntos de dados, por exemplo), – que é o caso da grande maioria das aplicações práticas. Em virtude disto, é necessário efetuar um mapeamento destes dados precisos para os conjuntos *fuzzy* (de entrada) relevantes, o que é realizado no estágio de fuzzificação. Neste estágio ocorre também a ativação das regras relevantes para uma dada situação (TANSCHKEIT, 2003).

A interface de fuzzificação faz a identificação dos valores das variáveis de entrada, as quais caracterizam o estado do sistema (variáveis de estado), e as normaliza em um universo de discurso padronizado. Estes valores são então

fuzzificados, com a transformação da entrada “crisp” em conjuntos *fuzzy* para que possam se tornar instâncias de variáveis linguísticas (SANDRI; CORREA, 1999).

No estágio de inferência ocorrem as operações com conjuntos *fuzzy* propriamente ditas. Os conjuntos *fuzzy* de entrada, relativos aos antecedentes das regras, e o de saída, referente ao conseqüente, podem ser definidos previamente ou, alternativamente, gerados automaticamente a partir dos dados. Um aspecto importante é a definição dos conjuntos *fuzzy* correspondentes às variáveis de entrada (antecedentes) e à(s) de saída (conseqüente(s)), pois o desempenho do controlador *fuzzy* dependerá do número de conjuntos e de sua forma (TANSCHHEIT, 2003).

A base de conhecimento consiste de uma base de dados e uma base de regras, de maneira a caracterizar a estratégia de controle e as suas metas. As regras podem ser fornecidas por especialistas, em forma de sentenças linguísticas, e se constituem em um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência *fuzzy*. A base de regras é formada por estruturas do tipo:

Se <premissa> **Então** <conclusão>.

Por exemplo:

Se *Erro é Negativo Grande e ΔErro é Positivo Pequeno*
Então *Velocidade é Positiva Pequena*.

Em um dado controlador *fuzzy*, é importante que existam tantas regras quantas forem necessárias para mapear totalmente as combinações dos termos das variáveis, isto é, que a base seja completa, garantindo que exista sempre ao menos uma regra a ser disparada para qualquer entrada. As premissas são relacionadas pelos conectivos lógicos, dados pelo operador de conjunção (e) e o operador de disjunção (ou). Em geral, as regras têm a forma de um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), mas que podem ser transformadas em vários sistemas com múltiplas entradas e uma saída (MISO). Por exemplo, a regra MIMO:

Se $x_1 \text{ é } A_1 \text{ e } \dots \text{ e } x_n \text{ é } A_n$ **Então** $y_1 \text{ é } C_1 \text{ e } \dots \text{ e } y_m \text{ é } C_m$

é equivalente a m regras MISO:

Se $x_1 \text{ é } A_1 \text{ e } \dots \text{ e } x_n \text{ é } A_n$ **Então** $y_j \text{ é } C_j$.

Em geral não se aceitam conectivos “ou” na conclusão (SANDRI; CORREA, 1999).

Um controlador *fuzzy* só terá um bom desempenho se as regras que definem a estratégia de controle forem consistentes. Extrair regras de especialistas na forma de sentenças do tipo “SE ... ENTÃO” pode não ser uma tarefa fácil, por mais conhecedores que eles sejam do problema em questão. Alternativamente ao uso de especialistas para a definição da base de regras, existem métodos de extração de regras de dados numéricos. Estes métodos são particularmente úteis em problemas de classificação e previsão de séries temporais (BRITO, Thiago. S. P, 2015).

4. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado em uma indústria de celulose do município de Três Lagoas entre os meses de janeiro a setembro de 2021. Foram analisados os dados de processo, utilizando o sistema aspenONE Process Explorer V12, plataforma de gerenciamento de informações industriais, que coleta dados de variadas fontes e armazena em um banco de dados, permitindo assim realização de consultas e análises para verificação de tendências e otimização dos processos.

Foram excluídos os dados de situações transitórias, como paradas e partidas do equipamento, esses dados foram plotados no software estatístico chamado MINITAB.

4.1 Dados numéricos

O trabalho utiliza informações do banco de dados de uma fábrica de celulose localizada no município de Três Lagoas no estado do Mato Grosso do Sul. Essas informações estão armazenadas em bancos de dados desde 2012, com dados de sensores instalados na fábrica. Para este trabalho temperatura foram utilizados: residual de oxigênio, CaCO_3 , CO e velocidade do IDF (Ventilador de tiragem induzida).

Foram utilizados dados coletados do OPC (Open Platform Communications), que significa Comunicações de Plataforma Aberta, trata-se de um conjunto padrão de especificações para a comunicação industrial. O OPC permite a troca de dados, que realiza a integração dos equipamentos de “chão de fábrica” com os sistemas de controle de forma segura e fácil.

4.2 Softwares

O software utilizado para a obtenção dos dados foi o aspenONE Process Explorer V12, que é um banco de dados SQL.

5. MÉTODOS

5.1 Estudo do forno de cal

A empresa de celulose opera com um forno de cal que pode ser dividido em quatro estágios, secagem, aquecimento, calcinação e resfriamento. Este forno tem como objetivo a recuperação da cal utilizada na etapa de fabricação do licor branco.

O forno é um reator químico horizontal e rotativo, revestido internamente com tijolos refratários. Tem como função suportar a lama processada, mantendo resistência à altas temperaturas. Também conta com material isolante, usado para diminuir a perda de calor através das paredes do equipamento. O forno é levemente inclinado, para que a lama de cal seja introduzida na parte mais elevada e, pelo movimento rotativo, o produto vai se deslocando em sentido contracorrente aos gases quentes provindos da combustão que ocorre no lado apostado, onde estão localizados os queimadores.

Neste processo, utiliza-se da transferência do calor resultante de combustão, para realizar a reação de calcinação da lama, convertendo o carbonato de cálcio em óxido de cálcio (cal recuperada), que dentro do ciclo de recuperação será novamente utilizada nas reações de caustificação.

A secagem, aquecimento e calcinação da lama demandam energia térmica, onde a conversão ocorre em temperaturas elevadas da cal, na faixa de 1100 à 1300°C.

Em geral, os fornos utilizam como fontes primárias de energia a combustão do gás natural ou óleo combustível. Também queimam os combustíveis auxiliares gerados no próprio site, como o metanol extraído na planta de evaporação; hidrogênio oriundo da planta química e gases residuais do processo.

A Figura 10 mostra o forno de cal de uma fábrica de celulose.

Figura 10 – Forno de Cal. Montes del Plata S.A., Uruguay



Fonte- ANDRITZ GROUP (2022)

A Tabela 1 mostra alguns dados do forno de cal em estudo.

Tabela 1- Dados do forno de cal em estudo

Dados do Forno de Cal	
Comprimento	165 m
Diâmetro	5,5 m
Inclinação	2%
Produção	1200 t/d

Fonte- ANDRITZ GROUP (2022)

5.2 Definição das variáveis de entrada e saída

Neste estudo foi utilizado o ventilador (IDF). Este ventilador succiona os gases provenientes da região de queima e os direciona ao precipitador eletrostático, que está acoplado à chaminé. Outro ponto a ser considerado é a quantidade de energia em MJ/kgCaO a ser transferida. Uma das variáveis de entrada do forno é a média das temperaturas da zona de queima, alimentação e dos gases de saída, que estão ligadas ao IDF, e outra variável de entrada é o teor de CaCO_3 que é inserida pelo

operador, após resultado da análise da cal pelo laboratório. A variável de saída é a velocidade do IDF obtida por meio do inversor de frequência.

5.3 Definição das restrições do controlador

A saída do controlador de velocidade do ventilador (IDF) opera, ou seja, trabalha entre 25 a 95%, que é respectivamente 250 a 950 rpm.

A temperatura dos gases da zona de queima é de 640 à 705°C, a temperatura dos gases da zona de alimentação de lama de cal fica entre 710 a 760°C, a temperatura dos gases de saída ficará entre 245 à 277°C, a concentração em massa do oxigênio deve ficar entre 0,9% a 1,3%.

5.4 Definição das regras de controle junto aos especialistas

A forma de obtenção do conhecimento prático do processo foi por meio de entrevista com os operadores e especialistas da área, e alguns trabalhos pesquisados.

5.5 Implementação do controlador proposto e análise os resultados

Na tela de operação, o operador deve observar os valores de saída do APC com os valores atuais de processo, verificar se a comunicação com o sistema está funcionando, deve também ter o conhecimento das variáveis que o controle utiliza e se não estão presentes em nenhum intertravamento no sistema, caso uma dessas condições esteja presente, o operador não deve ligar o controle. Se nenhum dos pontos abordados se verifica, o operador pode colocar o APC em operação.

5.6 Considerações sobre o emprego do sistema de controle avançado aplicado ao forno de cal em estudo

O objetivo geral do Controle Avançado de Processo (APC) é auxiliar o operador de SCDC na operação do forno de cal em condições estáveis e seguras, produzindo

cal com a qualidade desejada, com a máxima eficiência, dentro dos limites pré-estabelecidos do processo. O APC atinge este propósito trabalhando em conjunto com o sistema de controle regulatório. Por isso torna-se importante que toda a instrumentação do processo, bem como as malhas de controle regulatório estejam em boas condições de funcionamento, para que o APC atue de forma apropriada (SIMSCI-ESCOR, 2005). O APC ajusta a velocidade do ventilador induzido, a vazão de combustível e da lama de cal, respeitando restrições tais como limites dos teores de oxigênio, de CO e de TRS. Adicionalmente, ele ajusta as variáveis manipuladas de tal forma que o forno de cal opere no limite inferior do teor de O₂ determinado pelo operador. Caso uma restrição de processo diferente seja verificada, tal ocorrência de teor elevado de CO, o APC pode executar uma ou mais das seguintes ações:

- Aumento da velocidade do ventilador induzido
- Diminuição da vazão de combustível

A qualquer momento, o operador do processo poderá desligar parcial ou totalmente o sistema de controle avançado, ou ainda mantê-lo em operação dentro de limitações pré-definidas.

O APC atua simultaneamente sobre as variáveis controladas (CVs) e conduz o equipamento a seu ponto ótimo de funcionamento, compreendido entre os seus limites de operação e segurança, enviando *setpoints* para as variáveis manipuladas (MVs) de acordo com os respectivos limites máximos e mínimos especificados. O APC utiliza um conjunto de modelos pré-determinados de modo a predizer os valores futuros das variáveis de controle e as correspondentes alterações a serem aplicadas às variáveis manipuladas. O APC também monitora a variação sofrida pelas variáveis “*feedforward*” (FFs), buscando compensar os seus efeitos.

A eficiência térmica do processo, expressa em MJ/t de cal produzida foi calculada pelo sistema de controle avançado.

Um conjunto de telas configuradas no sistema supervisor do APC permite ao operador do forno de cal acesso aos parâmetros operacionais necessários, conforme estabelecidos.

O APC alcançará seus objetivos através de sua interação com controladores pré-existentes no controle regulatório. É fundamental, portanto, que estes controladores e a instrumentação estejam calibradas, caso contrário estes objetivos não serão alcançados.

O sistema de controle avançado foi instalado em um microcomputador PC conectado à rede da fábrica. Para que seja possível a monitorar este “*link*” de comunicação é necessária criar-se um composto de interface no processador onde residirem os blocos de controle regulatório.

5.6.1 Controle da concentração de Oxigênio

O controle envia ao SDCD a velocidade ideal do IDF (saída de gases do forno de cal) em porcentagem, com o objetivo de manter a estabilidade do oxigênio (variável controlada).

O controle ideal de oxigênio é definido por uma lógica *fuzzy*, que utiliza a temperatura da zona de queima, a temperatura da câmara de fumaça e a temperatura dos gases de saída do forno, buscando mantê-las dentro do range de segurança próximo aos valores definidos pelos especialistas e operadores de processo, entre 0,9% a 1,3%. As mudanças do SP (*Setpoint*) do oxigênio ocorrem de acordo com o perfil de temperatura do forno. Antes de mudar o SP o controle também observa se a saída do IDF está entre 25% a 95%.

5.6.2 Controle de temperatura dos gases

O controle envia ao SDCD o setpoint ideal de vazão de gás natural (GN), com o objetivo de manter a estabilidade da temperatura dos gases.

A medição do residual de CaCO_3 , além de calcular o SP ideal para a temperatura dos gases, também define o range de temperatura da zona de queima e faz a execução da correção da energia do forno. A cada novo resultado de análise do residual de CaCO_3 o controle atua imediatamente na vazão de gás natural e recalcula os *setpoints* ideais para as temperaturas do forno. As medições do residual de CaCO_3 são efetuadas em laboratório e este valor é inserido manualmente pelo operador no controle.

5.6.3 Controle de Energia do Forno de Cal

O forno de cal em estudo, queima hidrogênio, metanol e gás natural. O hidrogênio é gerado numa planta química anexa a empresa e o metanol é gerado no tratamento de gases na planta de evaporação do licor preto.

Para fins de redução de consumo, fixa-se as vazões de metanol e hidrogênio no máximo e a vazão de gás natural é variada pelo controle.

O controle de combustível do forno é baseado na Equação 10

$$EnergiaTotal = \frac{ProdForno \times SPEnergia}{24} \quad (10)$$

EnergiaTotal= energia a ser entregue ao forno de cal (MJ/h)

ProdForno= Produção diária do forno de cal (t)

SPEnergia= SP de energia específica (MJ/t de CaO)

5.6.4 Controlador *Fuzzy*

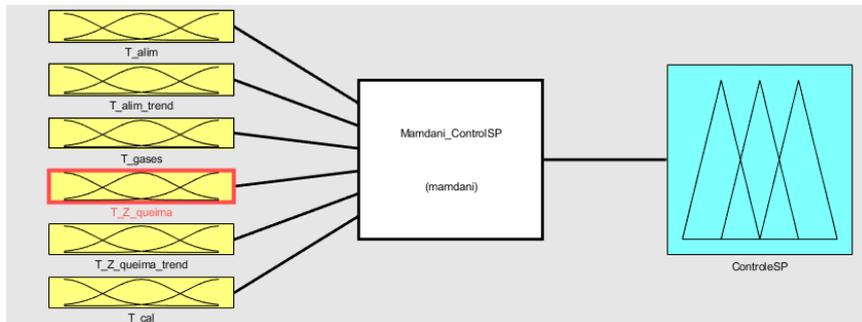
Os fornos de cal possuem vários instrumentos e atuadores que possibilitam o efetivo controle do forno. Técnicas modernas de controle veem sendo utilizadas com sucesso para estabilizar o forno em um ou mais pontos operacionais, mas não há ainda, dada a variabilidade da matéria prima um setpoint operacional que cubra todos estes pontos operacionais. Sendo assim, se torna necessário estudar formas de cálculo automático do *setpoint*, a fim de reduzir o consumo de combustível, garantir as emissões atmosféricas de forma racional ao mesmo tempo que todos os parâmetros restritivos, de segurança operacional, ou ambiental.

O controlador *fuzzy* apresenta-se como uma solução viável devido à possibilidade de resolver o problema de controle sem a necessidade de conhecimento do modelo da planta de forno de cal.

O controlador *fuzzy* controla a válvula de gás natural (GN), em função do erro gerado entre a diferença do valor de energia de saída, com a do valor desejado para o processo, *setpoint*. A diferença, pode ser negativa, positiva ou zero, em função das diferentes temperaturas ao longo do forno de cal.

A Figura 11 representa o controlador *fuzzy* com controle de *setpoint* em sua saída.

Figura 11-Sistema de controle *Fuzzy*



Fonte: Autor (2023)

Foram estabelecidas dezoito regras de implicação correspondente a seis variáveis fuzzificadas de entrada com três funções de pertinências, para cada uma. Elas atuam no controle de abertura e fechamento da válvula de gás natural (GN) e na velocidade do ventilador induzido (IDF).

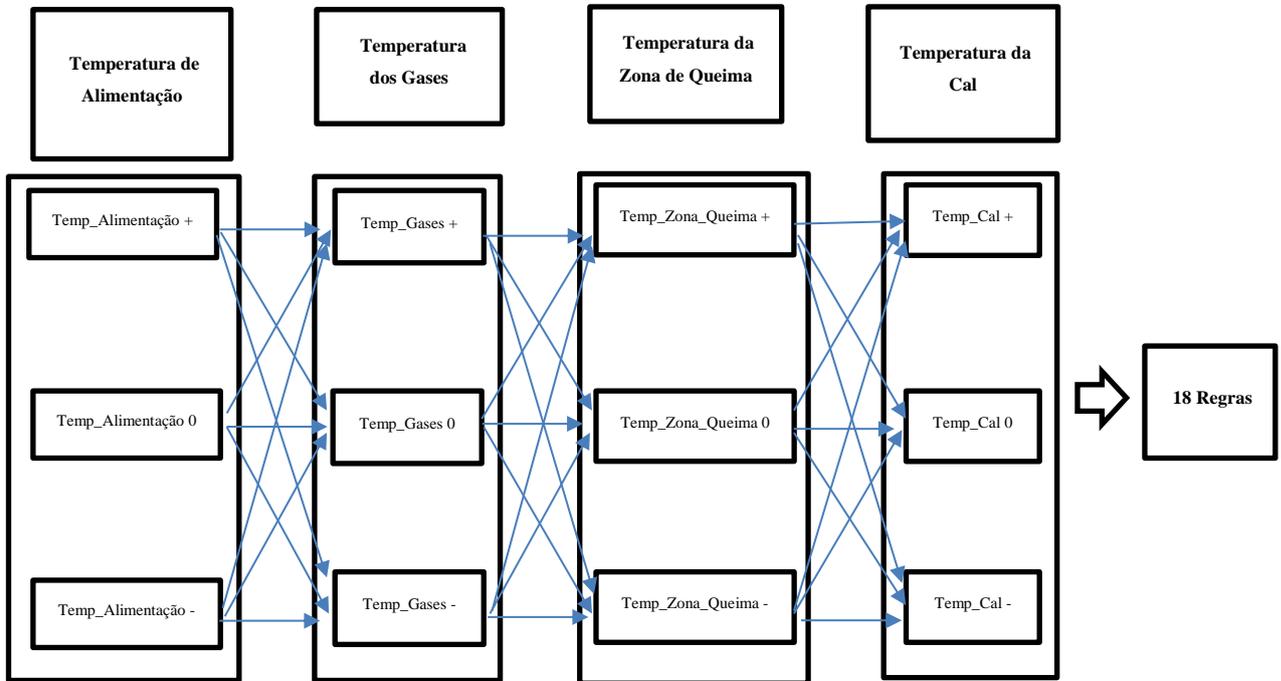
5.6 Regras de Implicação

Um componente importante do controlador *fuzzy* é a base de regras. Nelas, são traduzidas as experiências do time operacional de processos, para a forma linguística. Para o controlador deste trabalho, foram utilizados atributos variação negativa (descendo), variação zero (estável) e variação positiva (subindo), portanto tem-se três condições de operação para cada uma das grandezas envolvidas. Por exemplo, a condição da temperatura da alimentação de lama com variação positiva, implica em uma redução na velocidade do IDF, no sentido de reduzir a temperatura ao ponto desejado. Um exemplo de regra de implicação aplicada a este processo seria: “ se a temperatura da zona de alimentação for positiva e a temperatura dos gases for positiva e temperatura da zona de queima for positiva, então deve-se reduzir muito o *setpoint* (SP). ”

Seguindo-se este procedimento, foram estabelecidas dezoito regras implicação, correspondendo a seis variáveis de entrada com três funções de pertinência cada uma. A regras atuam no sentido de interferir no controle de *setpoint*

do IDF do forno em função das perturbações da temperatura de alimentação, da temperatura dos gases, temperatura da zona de queima e da temperatura da cal.

Figura 12- Possibilidades das funções de pertinência para a criação da base de regras.



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 13 estão as bases de regras de implicação para o controle de setpoint de saída.

Figura 13- Base de regras de implicação

```

1. If (T_alim is Baixa) and (T_alim_trend is Descendo) and (T_gases is Limite_4) and (T_cal is Baixa) then (ControleSP is AumentMuito) (1)
2. If (T_alim is Baixa) and (T_gases is Limite_4) and (T_Z_queima is Baixa) then (ControleSP is AumentMuito) (1)
3. If (T_gases is Limite_4) and (T_Z_queima is Baixa) and (T_Z_queima_trend is Descendo) then (ControleSP is AumentMuito) (1)
4. If (T_alim is Baixa) and (T_alim_trend is Descendo) and (T_gases is Limite_2) and (T_cal is Estável) then (ControleSP is AumentMédio) (1)
5. If (T_alim_trend is Estável) and (T_gases is Limite_2) and (T_Z_queima is Baixa) then (ControleSP is AumentMédio) (1)
6. If (T_alim is Estável) and (T_alim_trend is Descendo) and (T_gases is Limite_2) then (ControleSP is AumentMédio) (1)
7. If (T_gases is Limite_2) and (T_Z_queima is Baixa) and (T_Z_queima_trend is Descendo) then (ControleSP is AumentMédio) (1)
8. If (T_alim_trend is Descendo) and (T_gases is Limite_3) then (ControleSP is AumentMédio) (1)
9. If (T_alim is Estável) and (T_alim_trend is Descendo) and (T_gases is Limite_1) and (T_cal is Estável) then (ControleSP is AumentPouco) (1)
10. If (T_gases is Limite_1) and (T_Z_queima is Estável) and (T_Z_queima_trend is Descendo) then (ControleSP is AumentPouco) (1)
11. If (T_alim_trend is Descendo) and (T_gases is Limite_1) and (T_Z_queima is Estável) then (ControleSP is AumentPouco) (1)
12. If (T_gases is Alta) and (T_Z_queima is Estável) and (T_cal is Alta) then (ControleSP is ReduzPouco) (1)
13. If (T_alim is Alta) then (ControleSP is ReduzMédio) (1)
14. If (T_alim_trend is Subindo) and (T_gases is Alta) and (T_cal is Estável) then (ControleSP is ReduzMédio) (1)
15. If (T_gases is Alta) and (T_Z_queima is Estável) and (T_cal is Alta) then (ControleSP is ReduzMédio) (1)
16. If (T_Z_queima is Estável) and (T_Z_queima_trend is Subindo) then (ControleSP is ReduzMédio) (1)
17. If (T_alim_trend is Subindo) and (T_gases is Alta) and (T_cal is Alta) then (ControleSP is ReduzMuito) (1)
18. If (T_Z_queima is Alta) then (ControleSP is ReduzMuito) (1)
    
```

Fonte: Autor (2023)

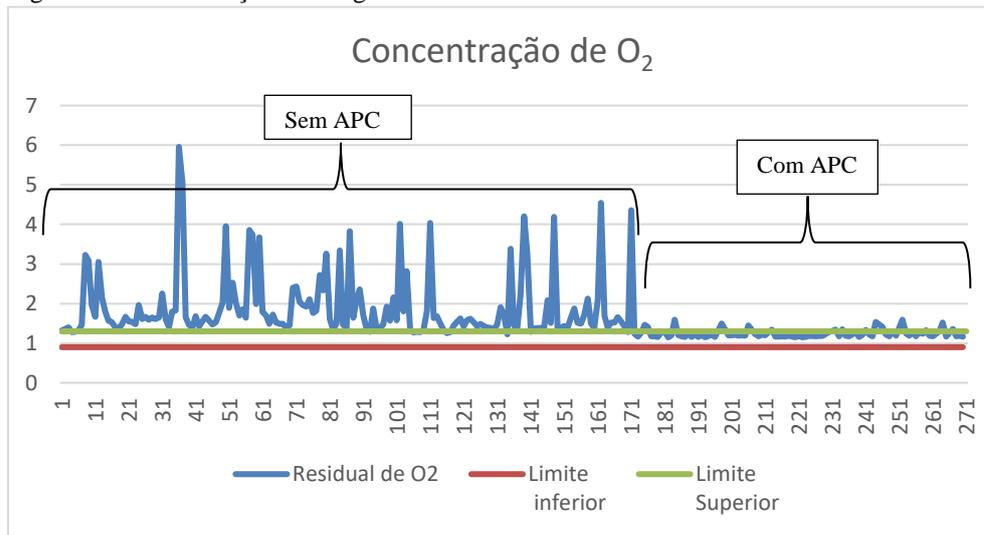
Foi selecionado o método de inferência Mamdani a ser utilizado neste trabalho. O método Mamdani permite associar as regras às variáveis linguísticas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O gráfico da Figura 14, apresenta o comportamento temporal da variável de processo concentração de O₂ em uma jornada de avaliação de 270 dias corridos.

Nesta Figura são mostrados o comportamento da variável considerada com e sem o emprego do APC.

Figura 14- Concentração de Oxigênio



Fonte: Autor (2023)

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de análise estatística no software minitab19, contendo as informações mais relevantes sobre o comportamento da variável de processo concentração de O₂. Pode-se observar uma redução de 32,24% na concentração média do O₂.

Tabela 2- Resultados da média e desvio padrão da concentração de oxigênio sem o APC

Variável	Média (%)	Desvio Padrão
O ₂ sem APC	1,8886	0,8044

Tabela 3- Resultados da média e desvio padrão da concentração de oxigênio com o APC

Variável	Média (%)	Desvio Padrão
O ₂ com APC	1,2797	0,0322

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de análise estatística no software minitab19, contendo as informações mais relevantes sobre o comportamento da variável de processo consumo de GN. Pode-se observar que houve uma redução de 6,1% do consumo médio do GN.

Tabela 4- Resultados da média e desvio padrão do consumo de gás natural sem o APC

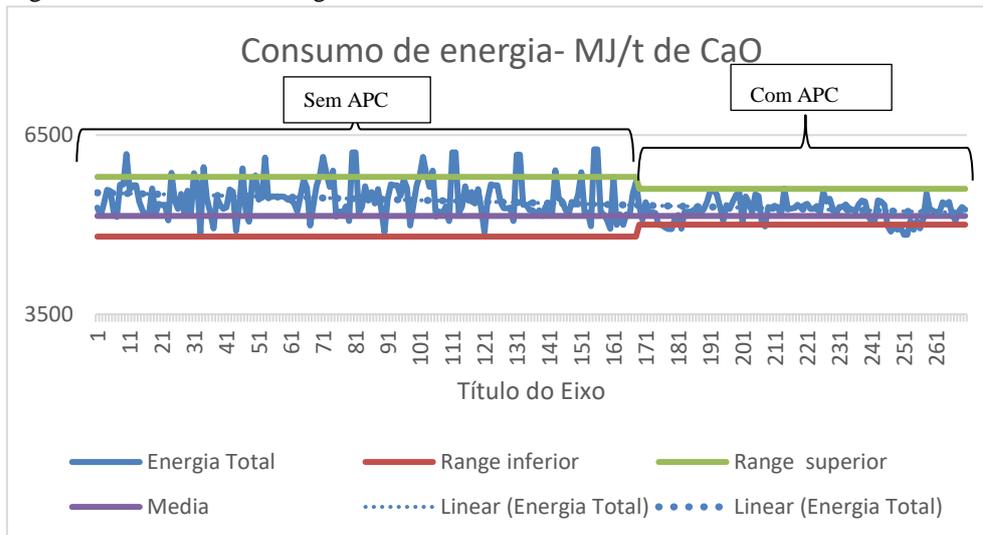
Variável	Média (Nm ³ /h)	Desvio Padrão
Consumo de GN sem APC	5064,80	336,9

Tabela 5- Resultados da média e desvio padrão do consumo de gás natural com o APC

Variável	Média (Nm ³ /h)	Desvio Padrão
Consumo de GN com APC	4755,80	277,9

O gráfico da Figura 15, apresenta o comportamento temporal da variável de processo consumo de energia em uma jornada de avaliação de 270 dias corridos. Nesta Figura são mostrados o comportamento da variável considerada com e sem o emprego do APC.

Figura 15- Consumo de energia em MJ/t de CaO



Fonte: Autor (2023)

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de análise estatística no software minitab19, contendo as informações mais relevantes sobre o comportamento da variável de processo Energia. Pode-se observar que houve uma redução de 4,02% do consumo médio de energia do forno.

Tabela 6- Resultados da média e desvio padrão da energia sem o APC

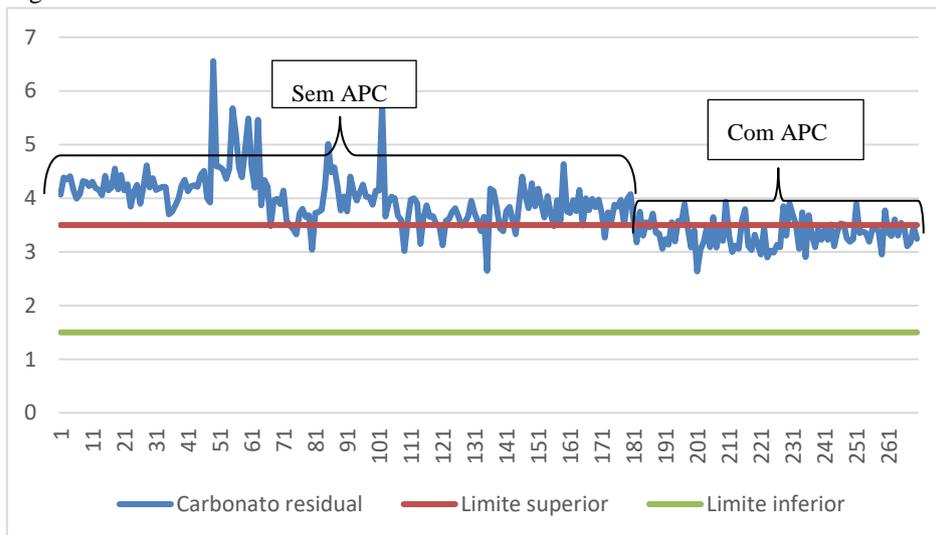
Variável	Média (MJ/t de cal)	Desvio Padrão
Energia sem APC	5449,30	322,4

Tabela 7- Resultados da média e desvio padrão da energia com o APC

Variável	Média (MJ/t de cal)	Desvio Padrão
Energia com APC	5230,2	180,0

O gráfico da Figura 16, apresenta o comportamento temporal do variável carbonato residual em uma jornada de avaliação de 270 dias corridos. Nesta Figura são mostrados o comportamento da variável considerada com e sem o emprego do APC.

Figura 16- Carbonato residual em %



Fonte: Autor (2023)

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de análise estatística no software minitab19, contendo as informações mais relevantes sobre o comportamento da variável de processo residual de carbonato de cálcio.

Tabela 8- Resultados da média e desvio padrão do residual de carbonato de cálcio sem o APC

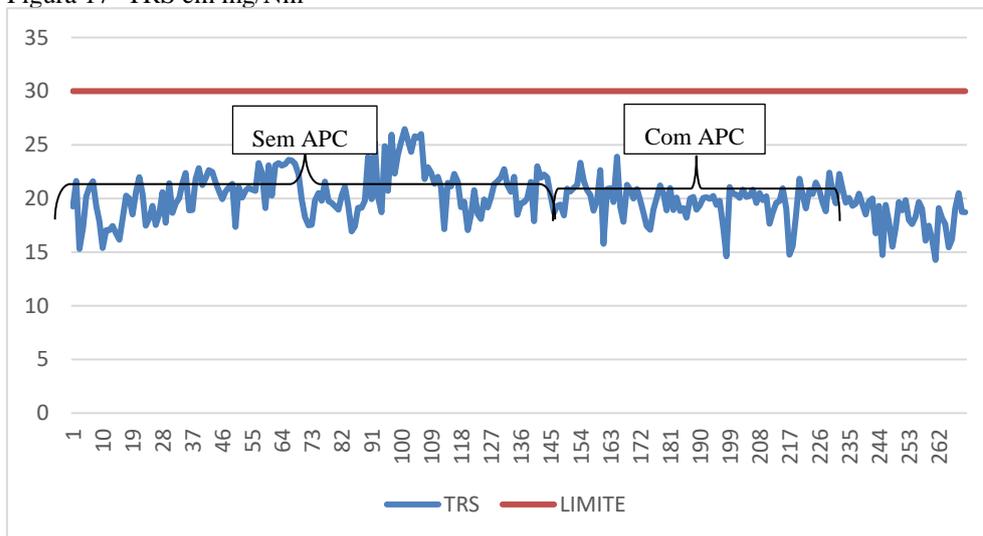
Variável	Média (%)	Desvio Padrão
Residual de carbonato sem APC	4,0157	0,4768

Tabela 9- Resultados da média e desvio padrão do residual de carbonato de cálcio com o APC

Variável	Média (%)	Desvio Padrão
Residual de carbonato com APC	3,3386	0,2652

Com base nas tabelas 8 e 9, pode-se verificar que o APC reduziu em 16,86% o residual de carbonato de cálcio.

O gráfico da Figura 17, apresenta o comportamento temporal da variável de processo TRS em uma jornada de avaliação de 270 dias corridos. Nesta Figura são mostrados o comportamento da variável considerada com e sem o emprego do APC.

Figura 17- TRS em mg/Nm³

Fonte: Autor (2023)

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de análise estatística no software minitab19, contendo as informações mais relevantes sobre o comportamento da variável de processo TRS.

Tabela 10- Resultados da média e desvio padrão do TRS sem o APC

Variável	Média (mg/Nm ³)	Desvio Padrão
TRS sem APC	20,579	2,237

Tabela 11- Resultados da média e desvio padrão do TRS com o APC

Variável	Média (mg/Nm ³)	Desvio Padrão
TRS com APC	19,173	1,693

Nas tabelas 10 e 11, pode-se verificar que o APC reduziu em 6,83% a variável TRS.

Com base nestas informações percebemos a estabilização do residual de O₂ com a implementação do APC e a redução do consumo de GN em torno de 6,1% e considerando-se o valor da tarifa do gás natural de R\$ 4,3056/m³ (Tabela 12, faixa de consumo de 50.001,00m³/dia à 150.001,00m³/d), a redução do consumo de 309Nm³/h (Valor médio horário consumido sem o APC Tabela 4 menos o valor médio horário consumido com o APC Tabela 5) e um tempo de operação de 355 dias no ano (foram considerados 10 dias de parada para manutenção), temos que: 309Nm³/h * 24 * R\$4,3056/m³ * 355= R\$11.335.267,01/ano.

Tabela 12 - Tarifa de fornecimento de gás natural no segmento industrial-Mercado Cativo

Faixa Inicial m³/dia	Faixa Final m³/dia	Tarifas sem Impostos - R\$/m³	Tarifas com Impostos - R\$/m³
0	0,60	4,7364	6,2884
0,60	16,00	4,5487	6,0392
16,00	151,00	4,4484	5,9060
151,00	301,00	4,1130	5,4607
301,00	1.001,00	3,7861	5,0267
1.001,00	50.001,00	3,2791	4,3535
50.001,00	150.001,00	3,2430	4,3056
150.001,00	Acima	3,1989	4,2470

Fonte: Diário Oficial Eletrônico n. 10.980-Portaria Nº 077/2022, de 31 de outubro de 2022

7 CONCLUSÃO

Ficou evidenciado um melhor controle na concentração de do O₂ com uma redução percentual do valor médio deste em 32,24% com a implantação do APC, com isto foi possível a redução da energia do forno em 4,02%, uma redução no consumo de gás natural (GN) de 6,1%, o que gerou uma redução no custo anual deste combustível de R\$11.335.267,01, o que vem de encontro com um dos objetivos propostos, que era a redução de custos, bem como o menor consumo de um combustível não renovável.

Outro fator importante foi a melhora na qualidade da cal de 16,86% demonstrada no residual de carbonato de cálcio.

Na variável ambiental TRS obteve-se uma redução de 6,83% em seu valor médio com o a implantação do APC, mantendo-a ainda mais abaixo do valor legislável que é de 30mg/Nm³.

Com base nos resultados apresentados neste trabalho pode-se constatar a melhoria obtida com a implementação do controle avançado de processo (APC) no forno de cal de uma indústria de polpa de celulose *Kraft* de eucalipto branqueada, comparando-se com a operação do forno de cal sem o controle avançado de processo (APC).

9 REFERÊNCIAS

1. ALMEIDA, E. H. Estudo de controladores baseados em lógica *fuzzy*. Ouro Preto - UFOP, 2006.
2. ANDRITZ GROUP. Disponível em <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/pulp-production/kraft-pulp/white-liquor-plants/limeline-kiln>.
3. AXEGARD, P.; CAREY J.; FOLKE J.; GLEADOW P.; GULLICHEN J.; PRYKE D. C.; REEVE D.W.; SWAN B.; ULOTH V. Minimum-impact mills: Issues and challenges. In: Proceedings of the minimum effluent mills Symposium. Tappi Press, Atlanta. pp. 529-541, 1997.
4. BILOBROVEC, M. Sistema especialista em lógica fuzzy para o controle, gerenciamento e manutenção da qualidade em processo de aeração de grãos. 2005-Universidade Tecnológica do Paraná, Ponta Grossa Pr.
5. BRITO, Thiago. S. P. Desenvolvimento de um controlador PID-Fuzzy para o controle de nível de água de um pressurizador de um reator nuclear. Recife-PE, 2015
6. CARDOSO, A. L, DOURADO, Antônio. A Reduced Order Model and a Robust Controller's Synthesis of a Black-liquor Evaporation System. Universidade de Coimbra. Departamento de Engenharia Informática. Coimbra Portugal. 1998.
7. CARVALHO, W. et al. Uma Visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. Quim. Nova. São Paulo, 29, outubro de 2009. Vol. 32, No. 8, pp. 2191-2195.
8. CASTRO, A. & FIGUEIRÊDO, L- Projeto de um controlador multivariável para fornos de cal utilizando equações de balanços de massa e energia. Controle & Instrumentação, 36-43. 2012
9. CGEE. O setor de celulose e papel no Brasil, 2013. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/anexo_publicacao_centro_tecnologico_celulose_papel_CGEE.pdf Acesso em: 27 de setembro de 2021.
10. EHRENFELD, John.R. **Industrial Ecology And Interdisciplinary**: A new Challenge for University Teaching And Research Programs. NTNUNorwegian University Of Science- and Technology. Noruega. 2001.

11. EPE. Eficiência energética, 2022. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>, [epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica-pesquisa](https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica-pesquisa) 02/03/22 às 20h45min)
12. FELICIANO, Rafaelle de Aguiar Correia. Controle *Fuzzy* espacialmente diferenciado para um sistema de irrigação. Natal, RN, 2013.
13. FERREIRA, D. J. O. Análise do escoamento de gases em uma caldeira de recuperação química via fluidodinâmica computacional. 2007. f 180. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
14. FIGUEIRÊDO, Leonardo Soares. MODELAGEM MATEMÁTICA DO ESTADO ESTACIONÁRIO DE UM REAL SISTEMA DE CAUSTIFICAÇÃO EM UMA FÁBRICA DE CELULOSE. 2009. 71f. Dissertação de mestrado – UNILEST, Coronel Fabriciano, 2009.
15. GEORGALLIS, M. Mathematical Modelling of Lime Kiln. 2004. 216 f. Tese de doutorado. University of British Columbia, Vancouver, 2004.
16. GRACE, T.M, Malcolm E.W & Kocurek M.J. Pulp and Paper Manufacture, Volume 5: Alkaline pulping. Technical Section Canadian Pulp & Paper Association, Atlanta (1989)
17. GUERRA, R. Projeto e simulação do controle de atitude autônomo de satélites usando lógica nebulosa. (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 190 p. 1998.
18. HOUGH, Gerald. Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Process. Tappi Press, Atlanta 1985.
19. HOGLUND, O. Environmental Technology in Pulp and Paper Industries. Kvaerner Pulping AB. Markaryd, Sweden. May 1999
20. <https://www.msgas.com.br/segmentos/industrial/tarifas>
21. IBÁ IBÁ 2021
22. INFOESCOLA, 2022 infoescola.com/ecologia/eficiencia-energetica-pesquisa em 02/03/22 às 21h).

23. IPPC - Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry. Sevilha. Espanha. European Commission. 2000.
24. KRAMM, D. J. Up date on lime sludge kilns in the pulp mil Environment- part I,II- Paper Trade Journal- 1979
25. LUNDQVIST, P. Mass and energy balances over the lime kiln in a *Kraft* pulp mill. 2009. Master Thesis – Uppsala Universitet, Suécia, 2009.
26. MACHADO, S. A. M. O que é Fuzzificação e Defuzzificação de um Valor Numérico? Blog em Gotas, 2016. Disponível em: <<https://emgotas.com/2016/11/14/o-que-e-fuzificacao-e-defuzificacao-de-um-valor-numerico/>>. Acesso em: 25 abr. 2018.
27. MALVEZZI, R. W. Uma Ferramenta Baseada em Teoria Fuzzy Para o Acompanhamento de Alunos Aplicado ao Modelo De Educação Presencial Mediado Por Tecnologia. São Paulo, v.1, n.1, p. 1-125, 2010.
28. MARQUES, P. E. A Lógica Fuzzy Aplicada ao Controle de Temperatura e Umidade. 2016. 165 f. Monografia (Graduação) - Engenharia da Computação, Centro Universitário de Brasília (UNICEUB), Brasília, 2016.
29. NORBOM, RH. Pequenas e baratas atualizações de fornos geram grandes ganhos de desempenho- Celulose e papel, vol 59 nº 2, pp 118-123- 1985
30. REZNIK, L., GHANAYEM, O., BOURMISTROV, A. (2000). PID plus fuzzy controller structures as a design base for industrial applications. Engineering Applications of Artificial Intelligence 13.
31. SANCHEZ, E.C.M. Controle por aprendizado acelerado e neuro-fuzzy de sistemas servo-hidráulicos de alta frequência- 2009
32. SANDRI, S.; CORREA, C. Lógica nebulosa. In: ESCOLA DE REDES NEURAIIS, São José dos Campos. Conselho Nacional de Redes Neurais. ITA - SP, 1999.
33. SIMSCI-ESCOR.2005. Connoisseur Multivariable Process Control Software Manual. USA.
34. SOUZA-SANTOS, M. L. Solid Fuels Combustion and Gasification - Modeling, Simulation, and Equipment Operations. Segunda Edição. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-4749-3.. 2010.

35. SPRINGER, A. M. Industrial Environmental Control. Pulp and Paper Industry. Tappi. Atlanta. USA 1993.
36. TANSCHKEIT, R. "Sistemas Fuzzy". In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI'03), 6. Bauru. Minicurso, p.35, 2003.
37. TRAN, H. Lime Kiln Chemistry and Effects on Kiln Operations. Tappi *Kraft* Recovery Short Course, 2008.
38. VENKATESH. The Rotary Lime Kiln, Chapter 8 in Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes, 3rd Edition, Edited by Green, R. P. and Hough, G., Tappi Press, p.153-279 (1992)
39. ZADEH, L. A. Fuzzy sets. Information and Control, v. 8, p. 338-353, 1965