



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELECTRÓNICA

TÍTULO DO TRABALHO:

**PROPOSTA DE MIGRAÇÃO DIGITAL DO SISTEMA DE CONTROLO DA PANELA DE
COZIMENTO DO AÇÚCAR (DE MANUAL À AUTOMAÇÃO) NA AÇUCAREIRA DE
MAFAMBISSE.**

Autor:

Ricardo Lucas Quembo

Estágio Profissional

Supervisores:

Eng. José Gabriel De Sa Consolo (UEM-FE)

Eng. Danilo Nguenha (Tongaat Hullet - Açucareira de Mafambisse)

Maputo, Dezembro de 2025



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELECTRÓNICA

TÍTULO DO TRABALHO:

**PROPOSTA DA MIGRAÇÃO DIGITAL DO SISTEMA DE CONTROLO DA PANELO DE
COZIMENTO DO AÇÚCAR (DE MANUAL À AUTOMAÇÃO) NA AÇUCAREIRA DE
MAFAMBISSE.**

Autor:

Ricardo Lucas Quembo

Estágio Profissional

Supervisores:

Eng. José Gabriel De Sa Consolo (UEM-FE)

Eng. Danilo Nguenha (Tongaat Hullet - Açucareira de Mafambisse)

Maputo, Dezembro de 2025

Dedicatória

À minha família pelo incessante apoio na projeção da minha carreira!

Agradecimentos

Porque na jornada da vida ninguém caminha só,

Agradeço à Deus pelo folego;

À minha família, em especial à minha Mãe e irmãos;

Aos meus supervisores;

A equipa de instrumentistas da Tongaat Hulett

Aos colegas dessa longa jornada;

Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta de migração digital e modernização do sistema de controlo da Panela de Cozimento de Açúcar na Açucareira de Mafambisse, que consiste na evolução de um processo manual actual, para um sistema totalmente automatizado, baseado num **Sistema de Controlo Distribuído (DCS)**. A intervenção teve como objetivo otimizar o processo de cristalização, aumentando a precisão, a repetibilidade e a eficiência produtiva. Foram integradas tecnologias como o controlo do teor de **Brix** (quantidade de substâncias dissolvidas no processo de fabrico do açúcar) por meio do instrumento **Digitrans**, a monitorização do nível da panela com um transmissor dedicado e o controlo de temperatura utilizando sensores Pt100. A centralização desses parâmetros no **DCS** reduziu a necessidade de intervenção humana e permitiu algoritmos de controlo mais estáveis e preditivos. Os resultados evidenciaram maior estabilidade no controlo do **Brix** e do nível, diminuição do tempo de batelada e melhoria da qualidade do açúcar produzido. O estudo reforça a relevância da automação industrial para a competitividade e sustentabilidade do setor açucareiro.

Palavra chave: Automação, DCS, Digitrans, Transmissor de nível, Pt100.

Abstract

This report suggest a migration and modernization project of the Sugar Cooking Pan control system, at the Mafambisse Sugar Mill, transitioning from a predominantly manual operation to a fully automated setup based on a **Distributed Control System (DCS)**. The main objective was to optimize the crystallization process by improving precision, repeatability, and overall production efficiency. The project integrated key technologies, including **Brix** control using a Digitrans instrument, pan level monitoring through a dedicated level transmitter, and temperature regulation with Pt100 sensors. Centralizing these parameters within the **DCS** reduced the need for constant human intervention and enabled more stable and predictive control algorithms. The results demonstrated significant improvements in **Brix** and level stability, reductions in batch time, and enhancements in the final sugar quality. This work highlights the importance of industrial automation for boosting the competitiveness and sustainability of the sugar industry.

Key word: Automation, DCS, Digitrans, Level transmitter, Pt100.

Índice

Dedicatória.....	ii
Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract.....	iv
Lista de Figuras.....	ix
Lista de tabelas.....	x
1. Introdução	1
1.1.Considerações Preliminares	1
1.2.Apresentação da Tongaat Hullet	1
1.2.1. Indústria açucareira em Moçambique.....	2
1.2.2. Apresentação da Açucareira de Mafambisse SARL.....	2
1.2.3. O que é o açúcar?.....	3
1.2.4. Qual a origem do açúcar?	3
1.2.5. Terminologias em processos de produção de açúcar.....	5
1.3.INTRODUÇÃO AO PROJECTO DE ESTÁGIO	7
1.4.Objetivos	7
1.4.1. Objetivo Geral.....	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5.Justificativa	8
1.6.Problema8	
1.7.Metodologia	9
1.8.Estrutura do Relatório	10
2. Revisão Teórica	11
2.1.PROJETO E OPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS	11
2.1.1. Formas para panela	11
2.2.Controlo de processos e modelos dinâmicos	18
2.3.Instrumentação: princípios de medição.....	18
2.4.Arquitectura de automação	18
3. Etapas de produção de Açúcar	23
3.1.Preparação	23
3.1.1. Gruas	23
3.1.2. Facas primárias	23
3.1.3. Facas secundárias (desfibradores).....	23
3.1.4. Detector de metais.....	23

3.2.Extração.....	24
3.2.1. Moinhos	24
3.3.Processos	26
3.3.1. Aquecedores.....	26
3.3.2. Adição de floculantes.....	27
3.3.3. Clarificação	27
3.3.4. Evaporação.....	28
3.3.5. Painéis	29
3.3.7. Centrifugação	31
3.3.8. Secagem e empacotamento	32
3.4.Atividades realizadas	33
4. Descrição do Processo de Cozimento do Açúcar	40
4.1.Etapas do processo	40
4.2.Interacção entre variáveis.....	40
4.3.Instrumentação e Variáveis de Processo	40
4.3.1. Brix	40
4.3.2. Temperatura	41
4.3.3. Pressão e Vácuo	42
4.3.4. Nível.....	42
4.4.Estratégias de Controlo e Migração	42
4.4.1. Controlo PID e <i>tuning</i>	42
4.4.2. Controlo em cascata e multivariável.....	43
4.4.3. Planeamento da migração	43
4.5.Implementação Prática: Arquitectura e Programação.....	43
4.5.1. Arquitectura proposta.....	43
4.5.2. Especificações de I/O.....	43
4.5.3. Lógica de controlo e blocos funcionais	44
4.6. Lista de material necessário	44
5. Considerações finais	45
5.1.Conclusões	45
5.2.Recomendações.....	46
6. BIBLIOGRAFIA	47
7. Anexos	A
7.1. Planta dos Processos da TH-ADM	A
7.2. Características gerais do PLC.....	B

7.3.	Diagrama eléctrico de Fonte de Alimentação.....	C
7.4.	Diagrama eléctrico de conexões com a carta digital e o relê.....	D
7.5.	Diagrama de conexões com o relê.....	E

Lista de abreviaturas e Siglas

AC	<i>Alternating current</i> (corrente Alternada)
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> (Conversor Analógico Digital)
ADM	Açucareira de Mafambisse
ADX	Açucareira de Xinavane
BLR	<i>Boiler</i> (Caldeira)
DC	<i>Direct current</i> (corrente continua)
DCS	<i>Distributed Control System</i> (Sistema de Controlo Distribuído)
DNA	Distribuidora Nacional de Açúcar
DT	<i>Data transceiver</i> (Transmissor de dados)
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Committee</i>
IGPE	Instituto de Gestão de Participações do Estado
IHM	Interface Homem Máquina
LC	<i>Load cell</i> (células de carga)
SARL	Sociedade Anónima de Recursos Limitados
VSD	<i>Variable Speed Drive</i> (Drive de Velocidade Variável)
TH	Tongaat Hullet
TH ADM	Tongaat Hullet Açucareira de Mafambisse

Lista de Figuras

Figura 1: Logotipo da Tongaat Hullet.[DNA].....	1
Figura 2: Logotipo do açúcar nacional distribuído pela DNA[DNA]	2
Figura 3: A estrutura da molécula de sacarose[SMRI(4)]	3
Figura 4: Estrutura interna da cana-de-açúcar e uma visão microscópica [SMRI (4)]......	4
Figura 5: Cana-de-açúcar e os seus derivados [Adaptado de SILVEIRA]	5
Figura 6: Ilustração de uma panela em lote em uso na TH ADM [SMRI (6)]......	11
Figura 7: Calandra fixa e flutuante respectivamente [SMRI (6)]	12
Figura 8: Purgador tipo flutuador [SMRI (6)]	15
Figura 9: Sistema de remoção de condensado em U [SMRI (6)]	15
Figura 10: O visor de nível de uma panela na TH ADM [Autor].....	16
Figura 11: Arquitecturas de automação para o sistema [Autor]	19
Figura 12: Transmissor de pressão diferencial de alto desempenho EJA210E. [15]	20
Figura 13: Transmissor de temperatura YTA610. [16]	20
Figura 14: Transmissor de sonda de RF, Digitrans [O autor].....	22
Figura 15: Ilustração dos maquinários de extração do sumo da cana. [CRUZ]	24
Figura 16: Filtros rotativos em uso na TH ADM [Autor].....	26
Figura 17: O Interior e o exterior de uma panela em uso na TH ADM [Autor].....	29
Figura 18: Estrutura de uma centrífuga [Machado, 2016].....	31
Figura 19: Centrífugas Broadbent A7 e A8 em uso na TH ADM [Autor]	32
Figura 20: Placa do circuito de operação de um medidor de brix [Autor]	33
Figura 21: Calibrador CA1 [Autor]	34
Figura 22: válvulas solenoides mais comum na TH ADM [Autor].....	35
Figura 23: Válvula solenoide acoplada no atuador pneumático [Autor]	35
Figura 24: Um dos transdutores I/P em uso na TH ADM [Autor]	38
Figura 25: Fluxograma de funcionamento no controlo de brix. [Autor].....	41
Figura 26: Fluxograma de controlo de temperatura. [Autor].....	41
Figura 27 o Fluxograma de controlo de nível. [Autor].....	42

Lista de tabelas

Tabela 1: Composição da cana-de-açúcar [SMRI (4)].....	4
Tabela 2: A composição aproximada do sumo extraído da cana-de-açúcar [SMRI (4)].....	4
Tabela 3: Atividades realizadas na semana 1 [Autor].....	33
Tabela 4. Combinação do calibrador para o mínimo valor de brix [DIGITRANS].....	34
Tabela 5. Combinação do calibrador para maior valor do brix. [DIGITRANS].....	34
Tabela 6. Actividades realizadas na semana 2 [Autor].....	34
Tabela 7: Actividades realizadas na semana 3 [Autor].....	36
Tabela 8: Actividades realizadas na semana 4 [Autor].....	37
Tabela 9: Actividades realizadas na semana 5 [Autor].....	37
Tabela 10: Material necessário [Autor].....	44

1. Introdução

1.1. Considerações Preliminares

A indústria açucareira é um pilar para o desenvolvimento económico de uma região e a açucareira de Mafambisse não é uma exceção, pois esta contribui visivelmente para o desenvolvimento da região circunvizinha da fábrica com a geração de emprego para a população local bem como com os projetos de responsabilidade social.

Na indústria açucareira a principal variável de entrada é a cana-de-açúcar, que no decorrer dos processos dela extrai-se as fibras para a alimentação das caldeiras como combustível e a polpa que passa por processos desde a clarificação à cristalização até a centrifugação de onde saem os cristais de açúcar e o melaço final.

Para além do açúcar como o principal produto da fábrica de açúcar, também se tem o melaço como o subproduto da cristalização do açúcar, melaço este que é usado na produção do etanol, como suplemento alimentar para animais e em outras indústrias como matéria-prima.

1.2. Apresentação da Tongaat Hullet

A Tongaat Hullet é uma empresa sul-africana envolvida principalmente na produção de açúcar, amido e outros produtos agrícolas. O nome Tongaat Hullet vem da fusão de duas companhias açucareiras **Tonga Sugar Company**, fundada em 1892 no kwazulo-Natal na África do Sul e da **Hullet's Sugar** que também era uma produtora de açúcar na região. A fusão das duas permitiu a ampliação nas operações, aumento da capacidade de produção e a expansão para mercado global de açúcar sendo Moçambique um dos países beneficiados desta expansão. Em Moçambique a empresa tem uma participação significativa na produção de açúcar, especialmente nas províncias de Maputo (Açucareira de Xinavane) e Sofala (Açucareira de Mafambisse).



Figura 1: Logotipo da Tongaat Hullet.[DNA]

1.2.1. Indústria açucareira em Moçambique

Em moçambique existem várias fabricas de açúcar que produzem açúcar para o consumo interno tanto quanto para exportação, essas fábricas estão localizadas em regiões onde o cultivo da cana-de-açúcar é favorável, sendo elas: açucareira de Xinavane em Maputo, Açucareira de Maragra também em Maputo, Açucareira de Marromeu em Sofala e a Açucareira de Mafambisse também na Província de Sofala. Sendo esta última o objeto de estudo na elaboração do projeto de estágio profissional. Para as fábricas compete apenas a produção e empacotamento, pois quando se trata de distribuição do açúcar existe uma entidade responsável pelo escoamento do açúcar em todas as províncias do País, a DNA (Distribuidora Nacional de Açúcar). Na produção do açúcar convencional e refinado, o processamento é feito de forma independente por cada fábrica, e no final o produto é vendido à DNA que se responsabiliza pela sua colocação no mercado nacional e, posteriormente, pela canalização das receitas às fábricas. O excedente da produção é destinado à exportação, onde cada fábrica se responsabiliza por garantir o mercado, sendo que a DNA fornece o apoio logístico necessário.



Figura 2: Logotipo do açúcar nacional distribuído pela DNA¹[DNA]

1.2.2. Apresentação da Açucareira de Mafambisse SARL

A Tongaat Hullet açucareira de Mafambisse SARL localizada na região centro do país, na província de Sofala, distrito de Dondo, a aproximadamente 60km da cidade da Beira. A fabrica se dedica no cultivo da cana-de-açúcar e a produção de açúcar desde o período colonial português. Com a revitalização e investimento estrangeiro pós crise. A Tongaat Hullet detém 85% das ações da açucareira de Mafambisse sendo os restantes 15% pertencente ao estado através do Instituto de Gestão de Participações do Estado (IGPE). A fabrica também gera subprodutos importantes, como melão, que é utilizado na produção de bebidas alcoólicas e rações para animais.

¹ Distribuidora Nacional de Açúcar

1.2.3. O que é o açúcar?

O termo 'açúcar' pode significar muitas coisas diferentes para pessoas diferentes, dependendo do contexto.

A **IUPAC**² define o açúcar como um termo para uma classe de hidratos de carbono cristalinos comestíveis, principalmente sacarose, lactose e frutose, caracterizados por um sabor doce.

A **FAO**³ define 'açúcar' como o termo utilizado para descrever os mono e dissacarídeos, enquanto que o 'açúcar' é utilizado para descrever sacarose purificada.

A **RSC**⁴ define o açúcar como o nome genérico para os hidratos de carbono doces, de cadeia curta e solúveis, muitos dos quais são utilizados na alimentação. São hidratos de carbono compostos por carbono, hidrogénio e oxigénio.

Quimicamente, a sacarose é um dissacarídeo (dois açúcares) formado pela combinação da glicose e da frutose. A sua fórmula química correta é $C_{12}O_{11}H_{22}$ e pode ser escrita como α -D-glucopiranosil- β -D-frutofuranosídeo. Nestas notas, "açúcar" significa sacarose. A estrutura da molécula de sacarose é apresentada na fig.3.

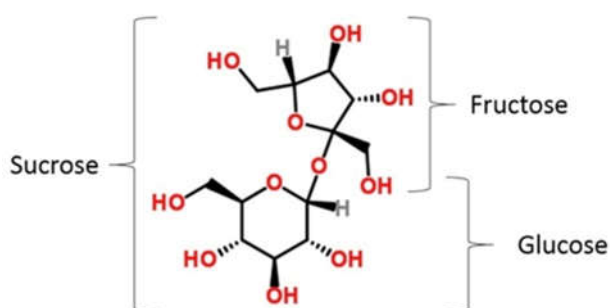


Figura 3: A estrutura da molécula de sacarose[SMRI(4)]

1.2.4. Qual a origem do açúcar?

Tal como a maioria das plantas, a cana-de-açúcar necessita de água, luz solar e dióxido de carbono (CO_2). À medida que o caule cresce, a planta utiliza a energia solar para a fotossíntese, produzindo glicose. As enzimas na planta convertem parte da glicose em frutose, e outras enzimas combinam os dois hidratos de carbono para formar sacarose. A

² IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry

³ FAO – Food and Agricultural Organisation of the United Nations

⁴ RSC – Royal Society of Chemistry

sacarose é o meio de armazenamento de energia no caule (ao contrário do amido do milho). Durante o crescimento da planta, uma vasta gama de enzimas produz celulose (um polímero de cadeia longa de glucose), hemicelulose (um polímero baseado numa cadeia de xilose) e lignina, que se combinam para produzir fibras. Isto fornece à planta a infraestrutur necessária para manter o caule ereto. [Gangwar et al. 2014]

A sacarose é armazenada no interior das células na região do entrenó, no interior do caule (ver fig. 4):

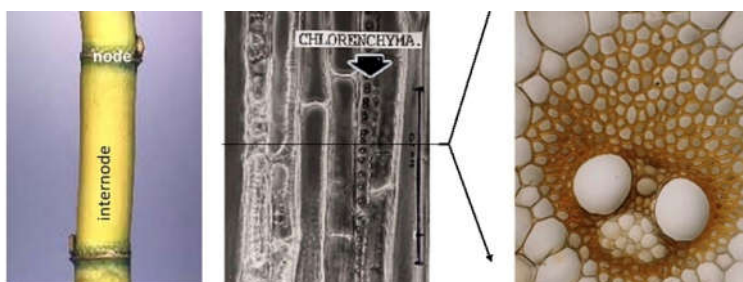


Figura 4: Estrutura interna da cana-de-açúcar e uma visão microscópica [SMRI (4)].

A composição aproximada da cana colhida, limpa manualmente, é apresentada na tabela abaixo:

Tabela 1: Composição da cana-de-açúcar [SMRI (4)].

Composição da cana-de-açúcar	%
Água	70
Sólidos dissolvidos	15
Fibra seca	15

A composição aproximada do sumo extraído da cana-de-açúcar colhida e limpa manualmente é apresentada na tabela abaixo:

Tabela 2: A composição aproximada do sumo extraído da cana-de-açúcar [SMRI (4)].

Composição do sumo	%
Açúcares	±13.9
	Sacarose. ±13%
	Glicose ±0.45%
	Frutose. ±0.45%
Inorgânicos	±0.6
	Potássio (K)
	Cálcio (Ca)
	Magnésio (Mg)
	Fosfato (PO ₄)
	Sulfato (SO ₂)
Outros	±0.5
	Ácidos orgânicos
	Polissacarídeos
	Proteínas
	Ceras
	Corpos coloridos

A seguir é ilustrado o diagrama da cana-de-açúcar e seus derivados, o que nos leva ao ponto crucial da elaboração deste trabalho que é o percurso de cana de açúcar, sumo e finalmente o açúcar.

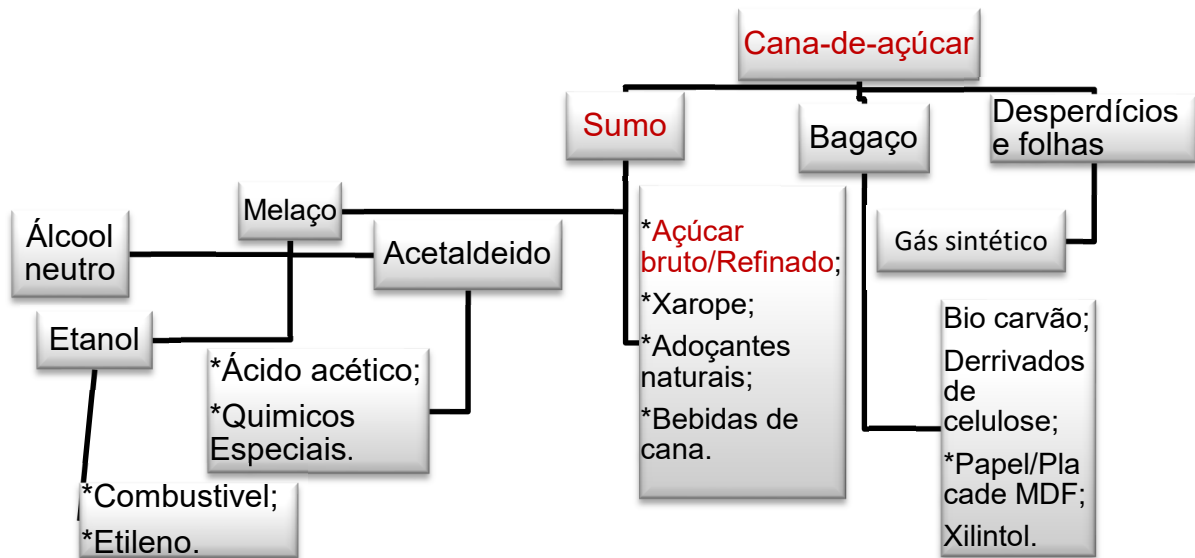


Figura 5: Cana-de-açúcar e os seus derivados [Adaptado de SILVEIRA]

1.2.5. Terminologias em processos de produção de açúcar

Brix

Para controlar o processo de fabrico do açúcar, é essencial conhecer a quantidade de substâncias dissolvidas em cada fluxo da fábrica (por exemplo, sumo, xarope, melaço, etc.). As substâncias dissolvidas são também designadas por sólidos dissolvidos. O Brix é definido como a percentagem em massa do total de substâncias dissolvidas (ou solúveis) numa solução, e é expresso pela seguinte equação:

$$B = \frac{m_B}{m_S} \times 100\%$$

Onde:

B é a percentagem dos sólidos dissolvidos (Brix)

m_B é a massa dos sólidos dissolvidos na solução;

m_S é a massa da solução.

Pol

O maior objectivo da industria de açúcareira é maximizar economicamente a extração e a recuperação do açúcar, as medidas do brix indicam sólidos dissolvidos num fluxo de processo, há necessidade também de se saber a quantidade de sacarose presente no fluxo de processo. O pol é definido como o teor aparente da sacarose de qualquer substancia, expresso em percentagem.

$$\%Pol = \frac{m_p}{m_s} \times 100\%$$

%Pol é a percentagem de pol numa dada solução;

m_p é a massa de sacarose aparente presente na solução;

m_s é a massa da solução.

Non-pol

O conteúdo non-pol de uma solução, é a parte do Brix da solução que não é sacarose, esta terminologia é muito importante na indústria pois é através dela que se chega a determinar a pureza. Ela é expressa pela diferença entre o Brix e o Pol.

$$Non_Pol = \%Brix - \%Pol$$

Pureza

A pureza de um produto de moagem é a relação entre o Pol e o Brix da solução obtida na moagem. Ela é definida como a percentagem da proporção da sacarose (Pol) em relação ao total de sólidos solúveis (Brix) num produto de açúcar e expressa pela equação:

$$Pureza = \frac{Pol}{Brix} \times 100\%$$

1.3. INTRODUÇÃO AO PROJECTO DE ESTÁGIO

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo Geral

- Propor uma Migração no Sistema de Controlo da Panela de Cozimento do Açúcar (de Manual à Automação) na Açucareira de Mafambisse

1.4.2. Objetivos específicos

- Relatar sucintamente as atividades desenvolvidas como engenheiro estagiário na oficina de instrumentação da açucareira de Mafambisse;
- Estudar os processos envolvidos na produção do açúcar;
- Estudar os dispositivos de campo e as variáveis de controlo presentes na panela de cozimento do açúcar;
- Descrever o atual sistema e suas limitações;
- Descrever os requisitos necessários para migração efectiva no sistema de controlo (de Manual à automação);

1.5. Justificativa

No decorrer do estágio profissional na açucareira de Mafambisse, na província de Sofala, verificou-se que o sistema de controlo da panela de cozimento do açúcar é manual, o que expõem fraquezas no processo de produção de açúcar como exposição dos operadores a riscos de acidentes, baixa produção, e mais. Com o desenvolvimento tecnológico, os sistemas tendem a ser minimalistas executando uma infinidade de aplicações, o que nos leva a sugestão de migrar o sistema de controlo actual para um que seja automático com potencial de melhorar a qualidade do açúcar, reduzir o custo de produção, aumentar a eficiência e garantir a segurança operacional. Com implementação do sistema espera-se uma transformação positiva no processo de produção do açúcar, tornando-o mais competitivo e sustentável a longo prazo.

1.6. Problema

Num contexto industrial em que a automação se tornou essencial para aumentar a eficiência, reduzir custos e garantir segurança operacional, a permanência de um sistema manual representa uma limitação significativa para a competitividade e sustentabilidade da produção. Diante dessas fragilidades, surge a necessidade de avaliar alternativas tecnológicas que permitam modernizar o sistema de controlo do processo de cozimento.

Assim, o problema central é:

Como a implementação de um sistema automático de controlo da panela de cozimento pode melhorar a eficiência, a segurança e a qualidade da produção de açúcar na Açucareira de Mafambisse?

1.7. Metodologia

Para a materialização do projecto serão recursos desde a Revisão literária, Análise do sistema atual, Definição dos requisitos, seleção da tecnologia e desenvolvimento do sistema.

a) Métodos de coleta de dados:

Observação direta

Entrevistas com operadores e especialistas

Análise de documentos e registros

b) Análise de dados

Análise estatística

Análise de tendências

Análise de causa e efeito

1.8. Estrutura do Relatório

O relatório é estrutura do em cinco partes de desenvolvimento do texto.

A primeira parte é a Introdução, onde se introduz as actividades do estágio e do projecto, e onde é estabelecido o problema focal do estágio na oficina de instrumentação da TH.

A segunda parte, intitulada Revisão Teórica, é dedicada à revisão dos aspectos teóricos e especificações do projecto para compreensão da modelagem, do sistema e da materialização do mesmo.

Na terceira parte, denominada Estágio Profissional, são descritas cronologicamente as actividades realizadas durante o estágio.

A penúltima parte, Resolução do problema e apresentação de resultados, é onde são mostrados os passos utilizados para resolver o problema, é realizada a modelagem, apresentação, análise e discussão de resultados da modelagem do enlace e culmina nas considerações ambientais, técnicas e económicas do projecto realizado.

O último aspecto do relatório é constituído pelas considerações finais onde são apresentadas as conclusões e recomendações do projecto e do estágio realizado.

Também estão incluídos anexos que contêm desenhos técnicos, programas curtos, fluxogramas, gráficos e métodos intermediários de determinação de parâmetros.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1. Projeto e Operação de Equipamentos

A ebulição de soluções concentradas de sacarose para evaporar a água e formar cristais é feita numa panela de vácuo. Uma panela de vácuo é um cristalizador evaporativo ou evaporador de efeito simples, concebido para lidar com materiais altamente viscosos. É um dispositivo para iniciar e controlar a cristalização do açúcar pela evaporação da água da solução concentrada de sacarose (licor-mãe) para manter a concentração desejada. Na correta sobressaturação, a panela é "granulada", ou seja, são adicionados pequenos cristais. Estes cristais crescem e a mistura de cristais e licor-mãe é designada por massa cozida.

O efeito do vácuo é reduzir o ponto de ebulição da solução. Isto apresenta duas vantagens principais: reduz a decomposição da sacarose devido à elevada temperatura e melhora a transferência de calor, mantendo uma diferença de temperatura suficiente entre o vapor e o líquido em ebulição, preservando assim uma boa taxa de evaporação. [SMRI (6)]

Tradicionalmente, a fervura do açúcar era feita em panelas de lote, mas a tendência moderna é utilizar panelas de processo contínuo.

2.1.1. Formas para panela

As modernas cubas de vácuo para processamento em panelas são cilindros verticais de aço soldados. As paredes das cubas são revestidas para minimizar a perda de calor.

As características básicas de uma panela para preparação em lotes são ilustradas abaixo:

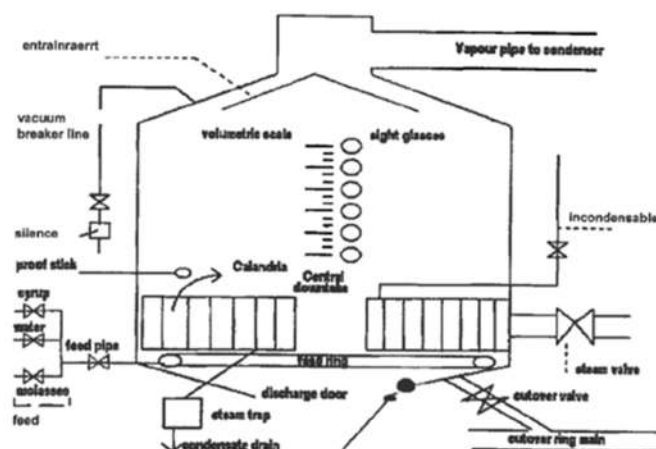


Figura 6: Ilustração de uma panela em lote em uso na TH ADM [SMRI (6)]

2.1.1.1. A calandra

A calandra é o elemento de aquecimento da panela e consiste num grande número de tubos cilíndricos fixos a uma placa tubular superior e inferior. Os tubos têm um diâmetro de cerca de 100 mm e um comprimento da ordem dos 1000 a 1500 mm. Os tubos são geralmente feitos de aço inoxidável.

O vapor que fornece a energia térmica é separado da massa cozida em ebulição pelas superfícies metálicas dos tubos, enquanto a massa cozida ferve no interior dos tubos. O número e o tamanho dos tubos determinam a área da superfície de aquecimento. A área da superfície de aquecimento determina a taxa de evaporação, sendo que esta área varia de acordo com a função da panela. [SMRI (6)]

Existem duas versões da calandra tubular em utilização:

A calandra fixa (em uso na TH-ADM) é constituída por placas tubulares fixadas nas laterais da panela e por uma tomada de água central. Na figura à esquerda.

A calandra flutuante é suportada no meio da panela com uma saída anular. A placa tubular inferior é geralmente escalonada.

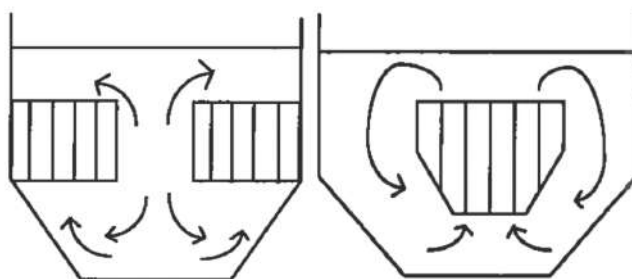


Figura 7: Calandra fixa e flutuante respectivamente [SMRI (6)]

2.1.1.2. Vapor

O vapor é a energia utilizada para aquecer a massa cozida. As calandras são alimentadas com vapor V1, proveniente da evaporação do sumo clarificado no evaporador de primeiro efeito. A força motriz por detrás do aquecimento é a diferença de temperatura entre a massa cozida e o vapor. Esta diferença de temperatura faz com que o vapor se condense (liberte o seu calor latente). O condensado é forçado a sair do tubo de condensado e a passar pelo purgador de vapor pela pressão do vapor no interior da calandra.

2.1.1.3. Sistema de vácuo

1) Condensadores

À medida que a massa cozida ferve na panela, são geradas grandes quantidades de vapor de água. Para manter o vácuo (baixa pressão) na panela, este vapor de água deve ser continuamente removido. Isto é feito usando um condensador. Um condensador é um recipiente utilizado para condensar vapor em líquido. Uma vez que o vapor se encontra no interior do condensador, é pulverizada água fria (água de condensação) sobre o mesmo, fazendo com que o vapor se condense. O objetivo de um condensador não é simplesmente condensar vapor, mas sim utilizar essa condensação para criar um vácuo que pode depois ser controlado pela água do condensador.

O vácuo pode ser controlado ajustando a quantidade de água que entra no condensador. Um aumento da quantidade de água aumenta o vácuo (até um máximo de aproximadamente -90 kPa). Uma diminuição da quantidade de água diminui o vácuo.

Um aumento do vácuo reduz a temperatura de ebulição da massa cozida e aumenta a taxa de evaporação. Uma diminuição do vácuo aumenta a temperatura de ebulição da massa cozida e diminui a taxa de evaporação.

2) Perna barométrica

Como a panela e o condensador estão sob vácuo e a água no poço de vedação está à pressão atmosférica, deve existir uma vedação para impedir que a água no poço de vedação seja sugada para dentro da panela.

Isto é feito através de um tubo barométrico ou tubo de escape. O tubo de escape deve ter pelo menos 10,4 metros de comprimento para equilibrar a diferença de pressão entre -80 kPa no condensador e a pressão atmosférica no poço de vedação. Se o tubo barométrico for demasiado curto, o condensador encherá de água e poderá transbordar para a panela.

3) Temperatura de aproximação

Diz-se que um condensador está a funcionar bem se a temperatura de aproximação for baixa. Esta temperatura é a diferença entre a temperatura do vapor à entrada e a temperatura da água à saída ($T_v - t_2$).

Quanto mais água for utilizada, menor será o t_2 . Isto aumenta a temperatura de aproximação e o condensador torna-se menos eficiente.

O controlo da água é, portanto, importante para garantir que o condensador está a funcionar de forma eficiente.

2.1.1.4. Gás não condensável

Gases não condensáveis que se acumulam na calandra

O vapor, embora constituído principalmente por água no estado gasoso, contém também ar e outros gases que não podem ser condensados. Estes gases são chamados de gases incondensáveis. Se estes gases não fossem removidos, acumular-se-iam na calandra, reduzindo assim a pressão do vapor na calandra, o que, por sua vez, diminuiria a temperatura do vapor saturado. Isto reduziria a diferença de temperatura (ΔT) entre o vapor e o líquido em ebulição e, portanto, reduziria a transferência de calor. Os gases não condensáveis são removidos por tubos que se estendem até ao fundo da calandra, os quais possuem orifícios ao longo do seu comprimento, permitindo a saída tanto de gases pesados como leves.

2.1.1.5. Remoção de condensado

Quando o vapor cede o seu calor latente na calandra, forma-se condensado. Este condensado deve ser removido de forma a que não haja vapor nem calor na calandra. Isto pode ser feito de duas formas:

1) Purgadores de vapor

Um purgador de vapor (ou armadilha de vapor, em inglês steam trap) é uma válvula automática essencial em sistemas que utilizam vapor, cuja principal função é drenar o condensado (água resultante da condensação do vapor) e gases não condensáveis (como o ar) do sistema, enquanto retém o vapor vivo no seu interior.

Existem vários tipos de purgadores de vapor em utilização sendo eles Armadilhas termostáticas, Armadilhas termodinâmicas com disco de válvula com mais detalhes falar-se-á do modelo em uso na TH_ADM armadilha do tipo flutuador (do inglês float type trap).

Armadilhas tipo flutuador

Um purgador tipo flutuador é um purgador mecânico que utiliza uma boia para drenar condensado de um sistema de vapor. O seu funcionamento baseia-se na diferença de densidade entre o vapor e o condensado: o condensado acumula-se, faz a boia flutuar e abrir a válvula para drenar, fechando-a novamente quando o condensado é removido. Este tipo de purgador é eficiente e não é afetado por variações de pressão. O dreno de condensado da calandra é ligado à entrada e a saída é ligada por tubagem a um tanque de condensado.

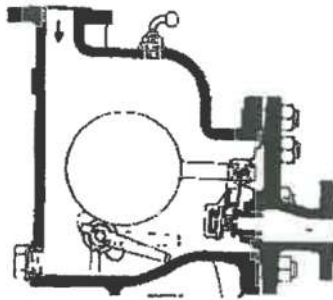


Figura 8: Purgador tipo flutuador [SMRI (6)]

2) Perna em U

O sistema de remoção de condensado em "U" consiste num tubo longo em forma de U. A extremidade superior de um dos tubos está ligada ao dreno da calandra e a extremidade superior do outro tubo está ligada ao tanque de condensado. A parte inferior do "U" deve estar o mais próxima possível do nível do solo, uma vez que o "U" atua como uma vedação entre a pressão da calandra e a pressão atmosférica. Se o "U" não for suficientemente longo para equilibrar esta diferença de pressão, a água será forçada para fora do "U", permitindo a fuga de vapor.

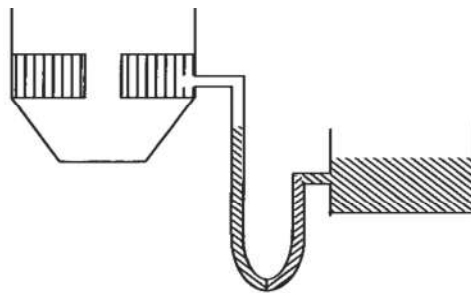


Figura 9: Sistema de remoção de condensado em U [SMRI (6)]

2.1.1.6. Visores

Janelas laterais semelhantes a vigias permitem ao operador da panela ver o nível da massa cozida a ferver. A iluminação é boa e uma escala calibrada em m³ fornece uma medida aproximada do volume da massa cozida na panela. Um sistema de lavagem (com água quente ou vapor) permite limpar os vidros interiores.

O visor de nível é encaixado no seu alojamento com uma vedação de borracha. Esta vedação garante que não há fuga de ar para o interior do reservatório. Ao substituir um visor de nível, deve ser utilizada uma vedação nova, uma vez que a antiga está danificada.



Figura 10: O visor de nível de uma panela na TH ADM [Autor]

2.1.1.7. Bastão de Prova

O bastão de prova é um dispositivo para retirar uma amostra da massa cozida em ebulição da panela enquanto esta está sob vácuo. Está montada acima da calandra e, abaixo desta, na lateral da panela, existe uma bacia de lavagem.

Ao recolher uma amostra, é importante que o bastão esteja limpo. Assim sendo, o bastão deve ser retirado, lavado e deixado de novo no tabuleiro, sendo depois novamente retirado juntamente com a amostra.

2.1.1.8. Tampa de inspeção ou manhole

Um manhole é uma abertura coberta, geralmente circular ou retangular, que fornece acesso ao interior da panela. Uma vedação de borracha garante que a porta fica hermeticamente fechada. Antes de fechar a porta, é importante certificar-se de que a vedação está limpa,

pois qualquer sujidade ou açúcar na vedação pode causar fugas de ar, o que dificultaria o controlo do vácuo.

Depois de trabalhos dentro da panela, deve se certificar de que todos os equipamentos foram removidos e que não está ninguém lá dentro antes de fechar a porta.

2.1.1.9. Porta de descarga

A porta de descarga utilizada para esvaziar a massa cozida após o fim da fervura tem um diâmetro da ordem dos 0,75 metros. As portas de passagem são operadas manualmente, mas as portas de descarga de panelas modernas e os sistemas das válvulas de cortes são abertas e fechadas por ação do óleo sob pressão num cilindro hidráulico. Na TH ADM a pressão requerida para operação das válvulas de descargas é garantida pelo ar comprimido e o torque vem dos actuadores pneumáticos.

Este ar sob pressão é geralmente fornecido por uma unidade central de potência a uma pressão de trabalho de aproximadamente 1 MPa. Ar este que é canalizado por tubos de pequeno diâmetro até aos painéis de controlo de cada panela. Cada painel de controlo consiste normalmente numa alavanca para abrir ou fechar a válvula. O acionamento da alavanca envia ar para a parte superior ou inferior do actuator de acionamento ligado à porta de descarga, abrindo-a ou fechando-a.

2.1.1.10. Saída de vapor

A válvula de saída de vapor isola a linha de vapor do espaço de ar da panela. O objetivo da válvula é admitir vapor na panela após o processo de calcinação, para derreter todos os vestígios de grãos restantes. O vapor deve, se possível, ser enviado para um tanque apropriado e não ser vertido directamente sobre a massa acabada de preparar. Parece inútil perder tempo a ajustar o ponto de açúcar (Brix) de uma panela e depois a diluir a massa no cristalizador com o vapor quente. O vapor que sai de uma panela também facilita o aumento do vácuo, uma vez que há muito vapor quente disponível para condensar no condensador. É possível quebrar o vácuo na panela abrindo a válvula de saída de vapor. Embora poupe tempo, pode causar problemas. Devido à alta pressão, haveria desperdício de vapor, que também poderia derreter os grãos à superfície durante a descarga.

2.2. Controlo de processos e modelos dinâmicos

O controlo de processos baseia-se na modelação das dinâmicas do sistema. Modelos típicos para uma panela de cozimento incluem relações de balanço de massa e energia e modelos empíricos para variação de Brix em função do tempo e da potência fornecida. Modelos lineares aproximados (primeira ordem com atraso) são frequentemente usados para projectar controladores PID.

O controlo de processos industriais baseia-se na medição contínua de variáveis e na atuação automática sobre o sistema para manter o processo dentro dos parâmetros desejados. Segundo [Ogata 2010], a automação moderna depende da integração entre sensores, controladores e atuadores, operando sob algoritmos de controlo PID ou estratégias avançadas.

2.3. Instrumentação: princípios de medição

A selecção do sensor deve considerar o princípio de medida, faixa de operação, estabilidade a longo prazo, e compatibilidade com os químicos do processo. Para Brix utilizam-se refratómetros digitais ou medidores de condutividade; para temperatura, PT100 e termopares; para pressão e vácuo, transmissores absolutos ou diferenciais; para nível, sensores de pressão diferencial, radar guiado por onda ou ultrassónicos, dependendo das condições de espuma e condensação.

2.4. Arquitectura de automação

Arquitectura típica são baseada em CLP (nível de controlo), IHM (interface homem-máquina) e SCADA (supervisório). A comunicação entre dispositivos pode usar protocolos industriais (Modbus RTU/TCP, Profibus, Profinet, Ethernet/IP). Sistemas distribuídos (DCS) são uma alternativa para grandes plantas.

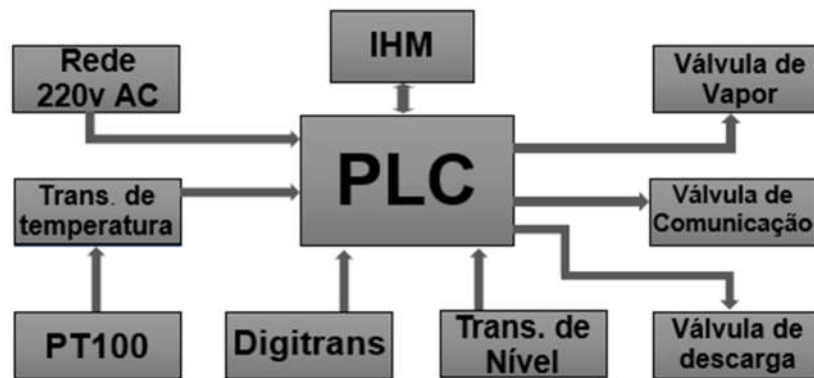


Figura 11: Arquitecturas de automação para o sistema [Autor]

2.5. Dispositivos de campo

Para o pleno funcionamento de qualquer sistema, há sempre a necessidade de colecta de informações para a tomada de decisões em resposta ao estado das variáveis de controlo. Com isso são listados os dispositivos de campo e as variáveis correspondentes a suas actuações.

2.5.1. Transmissor de pressão

O transmissor de pressão diferencial de alto desempenho EJA210E, com montagem em flange, pode ser utilizado para medir os níveis de densidade de líquidos em processo de solidificação ou precipitação. O EJA210E emite um sinal CC de 4 a 20 mA correspondente à pressão diferencial medida. O seu sensor preciso e estável também pode medir a pressão estática, que pode ser apresentada no indicador integrado ou monitorizada remotamente através de comunicação BRAIN ou HART. [Yokogawa, 2023]

Outras características importantes incluem a resposta rápida, a configuração remota através de comunicação e o autodiagnóstico. Estão disponíveis versões com protocolos FOUNDATION Fieldbus, PROFIBUS PA e 1 a 5 V CC com HART (Baixa Potência). Os modelos da série EJA-E, na sua configuração standard, com exceção das versões Fieldbus, PROFIBUS e Baixa Potência, possuem certificação de conformidade com o nível de segurança SIL2.



Figura 12: Transmissor de pressão diferencial de alto desempenho EJA210E. [15]

2.5.2. Transmissor de temperatura

Dentre vários transmissores disponíveis, há que destacar o YTA610 da yokogawa pela sua versatilidade assim como a presença do display responsável por mostrar a temperatura actual ao operário sem a necessidade de visitar o IHM do sistema.

O YTA610 é um transmissor de temperatura de alta precisão que aceita entradas de termopar, RTD, ohms ou milivolts CC e as converte num sinal CC de 4 a 20 mA ou num sinal Fieldbus para transmissão. O YTA610 suporta os protocolos de comunicação HART e FOUNDATION Fieldbus. O modelo HART possui certificação de conformidade com o nível de segurança SIL 2.



Figura 13: Transmissor de temperatura YTA610. [16]

FUNCIONALIDADES

Alta fiabilidade: A caixa de compartimento duplo proporciona uma elevada resistência a ambientes agressivos.

Variedade de entradas de sensores: O tipo de entrada do sensor pode ser selecionado pelo utilizador entre termopares (T/C), RTDs, ohms ou milivolts CC.

Comunicação digital: A revisão do protocolo HART é a 7 e o Fieldbus é o FOUNDATION. A configuração do instrumento pode ser alterada pelo utilizador utilizando o terminal fieldmate ou o terminal portátil.

Configuração de parâmetros locais: A configuração de parâmetros através de um botão oferece uma configuração fácil e rápida dos parâmetros.

Função de autodiagnóstico: A capacidade de autodiagnóstico contínuo garante um desempenho a longo prazo e um menor custo de propriedade.

Entradas universais duplas: A entrada dupla aceita dois sensores, como termopares, RTDs, ohms ou milivolts CC. É possível selecionar a medição de temperatura diferencial ou média. A função de reserva do sensor alterna automaticamente do sensor primário para a reserva em caso de falha.

2.5.3. Transmissor de sonda de RF

O transmissor de sonda de RF alimentado por loop de dois fios, foi desenvolvido para o controlo de brix de massas cozidas e licores em fábricas de cana-de-açúcar bruta ou fábricas de beterraba onde a utilização de sondas de RF de custo mais elevado não pode ser justificada ou onde é necessário um procedimento de calibração simples.

O transmissor de dois fios fornecerá medições superiores a um transmissor de condutividade, uma vez que responde a variações capacitivas e de resistência no meio de medição. Além disso, tal como outras sondas de RF, as medições são menos afetadas pela incrustação do elétrodo do que as sondas de condutividade.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O instrumento consiste basicamente num oscilador de frequência variável incorporado na cabeça da sonda, acoplado ao eletrodo da sonda. Um segundo oscilador serve de referência, e a diferença de frequência entre os osciladores de medição e de referência é convertida num sinal de saída de 4-20 mA.



Figura 14: Transmissor de sonda de RF, Digitrans [O autor]

3. Etapas de produção de Açúcar

3.1. Preparação

Muito antes da extração do caldo, acontece o processo chamado preparação da cana-de-açúcar antes da moagem envolvendo várias etapas cruciais para garantir que a cana esteja em condições ideais para a extração eficiente do caldo, que será posteriormente processado para a produção de açúcar. Desta preparação tem como entrada a cana-de-açúcar colhida e na saída tem-se as fibras da cana.

3.1.1. Gruas

São elas responsáveis pela descarga das canas-de-açúcar dos caminhões para a esteira rolante que as leva às facas, essas gruas são operadas por manoplas pneumáticas que controlam os cilindros que proporcionam torque para o manuseio das cargas.

3.1.2. Facas primárias

As facas primárias são de extrema importância no processo de preparação da cana-de-açúcar. Elas são responsáveis por cortar a cana em pedaços menores, o que ajuda a aumentar a superfície de contato para a etapa subsequente (desfibragem e extração do caldo). Entram nas facas primárias canas inteiras e saem para a desfibragem pedaços de aproximadamente 20cm devido a disposição das laminas, laminas estas feitas de aço de alta resistência, capaz de suportar o desgaste constante, a abrasão durante o corte da cana e resistir à corrosão, prolongando a vida útil das facas.

3.1.3. Facas secundárias (desfibradores)

Ao cortar a cana, as facas primárias preparam-na para o desfibrador, que irá romper as células da cana para liberar o caldo com mais eficiência. A principal função do desfibrador é preparar a cana para moagem pois a cana desfibrada apresenta melhores condições para ser moída, permitindo uma extração mais completa do caldo.

3.1.4. Detector de metais

A saída do desfibrador é a entrada para o moinho e é essencial a presença de um detector de metais para garantir a qualidade e segurança do produto final pois ele identifica e remove partículas metálicas que possam ter sido introduzidas durante o processo de desfibragem,

também ajuda a prevenir danos aos maquinários subsequentes, como moendas e centrífugas.

3.2. Extração

A extração consiste no processo físico de separação da fibra (bagaço) do caldo da cana sendo feito, fundamentalmente, por meio de dois processos: moagem ou difusão.

Na extração por moagem, a separação é feita por pressão mecânica dos rolos da moenda sobre o colchão de cana desfibrada. Na difusão, a separação é feita pela lavagem da sacarose absorvida ao colchão de cana.

Fibras = Bagaço + Caldo

- Fibras provenientes da preparação;
- Caldo com destino a etapas subsequentes da produção de açúcar;
- Bagaço é a fibra residual da cana após a extração do caldo, é separado e utilizado como combustível nas caldeiras;

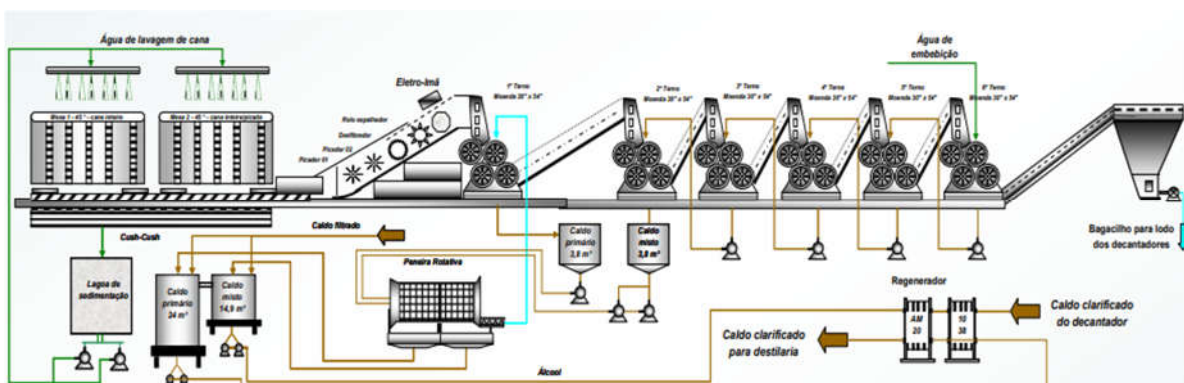


Figura 15: Ilustração dos maquinários de extração do sumo da cana. [CRUZ]

3.2.1. Moinhos

As fibras da cana vindas do desfibrador passam por uma série de moinhos. No caso da Acucareira de Mafambisse a moagem é composta por 6 moinhos dos quais um operado por motor elétrico e os restantes a vapor. Cada moimho consiste em rolos que esmagam a cana, liberando o caldo. Normalmente, a cana passa por vários moinhos em série para maximizar a extração do caldo.

3.2.1.1. Primeiro Moinho

O primeiro moinho é responsável por iniciar o processo de extração do caldo, esmagando a cana e liberando uma quantidade significativa de caldo, a eficiência do primeiro moinho pode variar, mas é comum que ele consiga extrair entre 60% a 70% do caldo disponível na cana. Na açucareira de mafambisse este moinho funciona por motor eléctrico. Ele também prepara a cana para os moinhos subsequentes, garantindo que a cana esteja adequadamente esmagada para maximizar a extração nos moinhos seguintes.

3.2.1.2. Os Restantes Moinhos

Assim como no primeiro moinho, nos moinhos subsequentes a missão continua sendo a mesma de extrair o máximo de caldo possível após a primeira moagem.

- Segunda Moagem: após a primeira extração, o bagaço (fibras restantes) passa por um segundo conjunto de moinhos. Este processo ajuda a extrair mais caldo que ainda está presente nas fibras, passando as fibras para moinho seguinte.
- Terceira e Quarta Moagem: O bagaço continua a passar por moinhos adicionais, cada um com a finalidade de extrair o máximo de caldo restante. A eficiência de cada moinho subsequente é menor que a do anterior, mas ainda assim importante para maximizar a extração total.
- Sexto moinho tem as configurações definidas para extrair o caldo restante do bagaço e garantir a humidade necessária do bagaço para o uso do mesmo como combustível nas caldeiras.

Depois do primeiro moinho tem ocorrido a embebição, a adição de água ao bagaço entre as moagens para ajudar a libertar mais caldo. O caldo extraído em cada etapa é coletado e combinado para seguir para as etapas de tratamento e refinamento.

3.2.1.3. Filtros Primários

Após a moagem, o caldo de cana-de-açúcar é coletado e passa por um processo de filtragem para remover impurezas e preparar o caldo para as etapas subsequentes de produção. Na TH ADM são dois filtros responsáveis por esta ação, desta ação são filtradas apenas as partículas maiores, como pedaços de bagaço e outras impurezas sólidas. Quanto aos sólidos dissolvidos é na etapa subsequentes.



Figura 16: Filtros rotativos em uso na TH ADM [Autor]

Nos moinhos entram as fibras e saem o bagaço e o sumo misto que antes de passar para outras fases passa por pesagem para se determinar a eficiência da extração.

Extração = Tons de *Pol* de Sumo/Tons de *Pol* de Cana

Tons de *Pol* de Sumo = *Pol* de Sumo*Tons de Sumo

Tons de *pol* de Cana = *Pol* de Cana*Tons de Cana

Tons é Tonelada

Pol é o Teor de Sacarose aparente da cana

O valor da extração determina a quantidade e qualidade do açúcar que será produzido na fábrica, quanto mais próximo de 100% for, mais satisfatório é.

3.3. Processos

3.3.1. Aquecedores

O aquecimento consiste em elevar a temperatura do caldo entre 103 e 105° C (Celsius). O aquecimento em si pouco reduz a contaminação microbiana devido ao baixo tempo de residência à elevada temperatura. Para aquecer o caldo, utiliza-se normalmente aquecedoras verticais, horizontais, tubulares. Após o aquecimento o caldo é levado para a próxima etapa. Na TH o processo é executado por dois grupos de aquecedores, cujo objectivo final é acelerar a reação química e a separação das impurezas para a clarificação.

3.3.2. Adição de flocculantes

O tratamento do sumo misto com cal não somente provoca a floculação e favorece a decantação das impurezas, mas também protege os equipamentos contra a corrosão. Em relação ao pH a ser alcançado, quanto mais se aproxima de 7, maior é a remoção de nutrientes do caldo e o excesso de cal pode afetar o crescimento da levedura em cultura. O pH do sumo decantado é ideal quando atinge a faixa entre 5,6 e 5,8, pois não provoca remoção significativa de nutrientes e diminui a ação corrosiva do sumo sobre os equipamentos, além de favorecer a redução do número de microrganismos contaminantes. A adição da cal é conduzida continuamente pela mistura do leite de cal com o sumo misto no tanque de calagem, sendo a dosagem automaticamente controlada pelo monitoramento do pH do sumo.

3.3.3. Clarificação

A clarificação do sumo é essencial para remover impurezas e preparar o caldo para a produção de açúcar. Esta acção garante que o sumo esteja limpo e pronto para as etapas de evaporação e cristalização, essenciais para a produção de açúcar de alta qualidade. A seguir alguns processos de clarificação.

- **Sulfitação:** Este é o método tradicional, onde dióxido de enxofre (SO_2) é adicionado ao sumo. O SO_2 ajuda a destruir substâncias corantes e desinfetar o sumo. No entanto, este método pode ter impactos ambientais negativos devido à toxicidade do enxofre.
- **Ozonização:** O ozônio (O_3) é utilizado para oxidar e remover impurezas do caldo. Este método é eficiente e tem menos impacto ambiental, mas pode ser mais caro devido ao custo do ozônio.
- **Bicarbonatação:** Este método utiliza bicarbonato de cálcio, que se decompõe em carbonato de cálcio insolúvel ao aquecer o caldo. Isso ajuda a remover impurezas de forma eficaz e é considerado menos poluente.
- **Carbonatação:** Este método, dióxido de carbono (CO_2) é adicionado ao caldo junto com cal (CaO). Isso forma carbonato de cálcio (CaCO_3), que ajuda a precipitar impurezas. A carbonatação é considerada mais amigável ao meio ambiente em comparação com a sulfitação e mais económico em comparação com os demais sendo a mais predominante nas açucareiras moçambicanas no geral e em particular na ADM.

3.3.4. Evaporação

A evaporação é uma etapa essencial na produção de açúcar, usada para remover a água do sumo clarificado da cana-de-açúcar e concentrar o açúcar. Isso facilita a cristalização e reduz o volume para a etapa seguinte, geralmente operando com uma temperatura entre 100°C e 140°C, dependendo do equipamento e do processo.

Objetivos da evaporação:

- Aumentar a concentração de açúcar.
- Reduzir o volume do suco, economizando energia no cozimento.

3.3.4.1. Tipos de evaporadores:

a) **Película fina:** São equipamentos usados para evaporar líquidos, de forma rápida e eficiente produzindo um sumo mais concentrado e com menos impurezas neste sistema o sumo forma uma película fina sobre a superfície aquecida seja por vapor ou por outra fonte térmica.

Vantagens:

- Alta eficiência na evaporação;
- Menor tempo de residência, evitando degradação do suco;
- Melhor qualidade do produto final, por preservar melhor os compostos.

b) **Múltiplo efeito** (Em uso na Açucareira de Mafambisse) é um sistema composto por vários vasos conectados em série para evaporar água do suco de cana-de-açúcar de forma eficiente, onde o vapor gerado em um efeito é reutilizado como fonte de calor no efeito seguinte, economizando assim a energia térmica.

Vantagens

- Alta eficiência energética;
- Menor custo operacional;
- Processo contínuo ideal para grandes volumes de produção.

3.3.5. Painelas

A fervura bem-sucedida de uma massa cozida exige que o operador do estágio da panela controle a concentração de sólidos do massamãe na panela para que esteja a uma sobresaturação suficientemente elevada para proporcionar uma taxa de crescimento de cristais suficientemente rápida, mas não tão elevada que ocorra a nucleação (formação de grãos finos). É menos provável que se formem grãos finos se a massa cozida tiver um conteúdo de cristais suficiente. (Foster et al. 1960).

A na TH ADM utilizam a medição da condutividade da massa cozida para orientar o operador sobre as condições da massa cozida. A dificuldade para o operador é que o valor da condutividade é influenciado pela sobressaturação da massa mãe, pelo teor de cristais, pela temperatura e, notavelmente, pela condutância das impurezas, que se altera com as variações do fornecimento de cana e algumas operações de processamento, como a adição de cal. Apesar destas dificuldades, a condutividade da massa cozida tem sido utilizada eficazmente na TH ADM como a única variável de processo para controlar as condições da massa cozida.



Figura 17: O Interior e o exterior de uma panela em uso na TH ADM [Autor]

3.3.6. Cristalização

O cristalizador é um equipamento fundamental no processo de produção de açúcar, atuando após o cozimento e antes da etapa de centrifugação. Ele responsável por promover e controlar o crescimento dos cristais de sacarose presentes na mistura espessa resultante do cozimento, chamada de massa cozida (que é composta pelos cristais de açúcar envoltos no melaço).

A eficiência da centrifugação depende diretamente da qualidade da massa cozida produzida no cristalizador. O cristalizador influencia a centrifugação na uniformidade e tamanho dos

cristais de açúcar pois é no cristalizador, através do resfriamento controlado e agitação da massa cozida, os cristais de açúcar têm tempo e condições ideais para crescerem de forma mais uniforme e atingirem o tamanho desejado (granulometria). Assim sendo, cristais uniformes e com bom tamanho centrifugam melhor, pois facilitam a passagem do melaço entre os espaços intercristalinos, resultando em uma separação mais eficiente.

O processo no cristalizador (resfriamento e agitação) ajuda a reduzir a supersaturação da massa mãe remanescente. A agitação impede a formação de aglomerados de cristais e uniformiza a temperatura, o que contribui para uma massa cozida menos viscosa. Assim sendo, uma massa cozida com menor viscosidade e cristais bem formados permite que o melaço seja drenado mais rapidamente e completamente durante a centrifugação, aumentando o rendimento de açúcar.

Tipos de cristalizadores

- Cristalizadores resfriados a água;
- Cristalizadores contínuos;
- Cristalizadores de lote;
- Cristalizadores resfriados a ar (Em uso na TH_ADM).

Cristalizadores resfriados a ar (Em uso na TH_ADM)

São recipientes abertos e horizontais, em formato de "U" ou de diâmetro circular. O dispositivo de agitação consiste em um eixo central equipado com braços agitadores. A massa cozida é resfriada por ar por radiação através das paredes do cristalizador e da superfície do mesmo. O resfriamento é muito lento. Esses tipos de cristalizadores são geralmente usados para massas cozidas de alta qualidade. [Sugartech]

o cristalizador é a etapa em que se prepara a massa cozida para a separação final. Independentemente do modelo do cristalizador é uma boa operação do mesmo que é crucial para obter uma massa cozida de alta qualidade, garantindo que a centrifugação seja a mais rápida e eficiente possível, maximizando a recuperação do açúcar e a qualidade do produto final.

3.3.7. Centrifugação

Com a “massa-mãe” tecnicamente esgotada, é necessário separá-la dos cristais para obter o açúcar propriamente dito. Esse processo de separação da massa-mãe dos cristais de açúcar é realizado pelo sistema de centrifugação através de turbinas centrifugas.

As centrifugas podem ser agrupadas em dois tipos principais: centrifugas intermitentes e centrifugas contínuas. De forma geral, as centrifugas de açúcar compõem-se de um cesto metálico telado, ao qual se conecta um eixo vertical através da sua extremidade inferior. Este eixo, por sua vez, é acionado por um motor elétrico, sendo o movimento transferido ao conjunto eixo/cesto através de polias. Assim, estando o motor em funcionamento, seu movimento é transferido ao conjunto eixo/cesto, provocando rotação. Esse movimento de rotação, por sua vez, acaba por gerar força centrífuga no interior do cesto. [MACHADO, 2016]

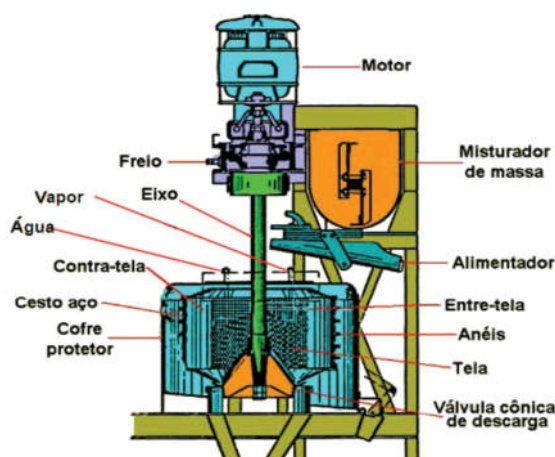


Figura 18: Estrutura de uma centrífuga [Machado, 2016]

Dessa forma, quando o cesto se encontra em movimento, a tendência que se apresenta é de a massa cozida espalhar-se sobre a superfície interna da tela. Com o aumento da rotação, há intensificação da força centrífuga, fazendo com que o “licor-mãe” drene através dos orifícios da tela.

Os cristais de sacarose, por sua vez, são retidos no interior da tela. No caso de centrifugas intermitentes, as porções iniciais do mel drenado são denominadas de “mel pobre”. Porém, após a aplicação de água e injeção de vapor para a remoção do filme de “licor-mãe”, que ainda permanece recobrendo os cristais de sacarose (conferindo-lhes coloração escura). A porção de mel obtida apresenta maior teor de sacarose. A junção desta porção (com maior teor de sacarose) com o “mel pobre” resulta na obtenção do “mel rico”.



Figura 19: Centrifugas Broadbent A7 e A8 em uso na TH ADM [Autor]

3.3.8. Secagem e empacotamento

Quando o açúcar possui umidade elevada, sua deterioração é acelerada, resultando em maiores perdas. O inverso também é verdadeiro. No caso do açúcar demerara, devido ao seu processo de centrifugação, seu teor de água situa-se na faixa de 0,5-2%. Assim, independentemente do tipo de açúcar, faz-se necessária a realização da secagem do açúcar de tal forma que a sua umidade seja reduzida aos níveis de 0,1-0,2%. [BRAGA et al. 2024]

Entre as partes constituintes de um secador de açúcar, destacam-se o aquecedor de ar e um ventilador que promove a circulação do ar quente em contra corrente à movimentação do açúcar no interior do secador. A temperatura do ar de secagem não deve ultrapassar a marca de 100°C. O ideal é que, na saída do aquecedor, o ar apresente temperatura na faixa de 70-95°C. Nessa condição, tem-se a certeza de que não haverá prejuízos em termos de qualidade decorrentes do amarelamento dos cristais por conta de aquecimentos exercidos pelo ar empregado.

Outra variável importante nessa fase do processo é a velocidade do ar de aquecimento. A mesma deve ser regulada para permanecer na faixa de 1-5 m/s. Contudo, a definição da melhor velocidade é estabelecida por levantamentos realizados sobre eventuais arrastes de cristais finos de açúcar. Se, numa determinada velocidade, esse arraste estiver ocorrendo de forma significativa, devem-se adotar velocidades menores.

3.4. Atividades realizadas

Tabela 3: Atividades realizadas na semana 1 [Autor]

Dia	Actividade	Área	Supervisão
12.05	Calibração de brix meter.	Processos	Eng. Danilo
13.05	Instalação de manómetros nos cristalizadores.	Processos	Eng. Danilo
14.05	Configuração de transmissor de fluxo Calibração de válvulas dos evaporadores.	Processos	Eng. Danilo
15.05	Canalização de ar da pan3 ao tanque de preparação.	Processos	Eng. Danilo
16.05	Remoção, calibração e instalação de manómetros de cristalizador.	Processos	Eng. Danilo

Actividade a destacar

- **Calibração de brix meter**

Um parâmetro importante para a extração do açúcar é a concentração da massa cozida. A medição do teor de matéria seca, geralmente representado como Brix, é absolutamente essencial para otimizar, controlar e melhorar a qualidade do açúcar.

Os componentes eletrónicos são montados numa única placa de circuito impresso alojada na cabeça da sonda. O circuito é encapsulado em resina para proporcionar proteção contra vibração e humidade.



Figura 20: Placa do circuito de operação de um medidor de brix [Autor]

Para calibrar o instrumento, a sonda é retirada do prato e um calibrador é fixado ao elétrodo. O calibrador é configurado para simular um brix baixo e o zero é ajustado. O calibrador é então configurado para simular um brix elevado e o span é ajustado. O zero e o span são ajustados ajustando dois potenciômetros de ajuste de 20 voltas no módulo eletrónico dentro do alojamento da sonda. Um terceiro potenciómetro vem ajustado de fábrica e selado com epóxi. Não pode ser ajustado pelo utilizador.

Calibrador CA1



Figura 21: Calibrador CA1 [Autor]

Para

Semente A e massa A

Semente B e massa B

Semente C

Escala de medição aproximadamente: 75-95 brix

Modelo do calibrador: CA1

SET ZERO (4 mA)

Tabela 4. Combinação do calibrador para o mínimo valor de brix [DIGITRANS]

Switch	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Posição	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1

SET SPAN (20 mA)

Tabela 5. Combinação do calibrador para maior valor do brix. [DIGITRANS]

Switch	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Posição	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0

Tabela 6. Actividades realizadas na semana 2 [Autor]

Dia	Actividades	Área	Supervisão
26.05	Manutenção de válvulas solenoides.	Processos	Eng. Danilo
27.05	Lançamento de cabo de fibra óptica do controlo BLR ao MCC.	Caldeiras	Itai Moyo
28.05	Diagnóstico da origem da falha do funcionamento da camera da mesa de preparação.	CCTV	Eng. Canisio
29.05	Manutenção de atuadores de descargas da PAN3 à PAN6.	Processos	Eng. Danilo
30.05	Instalação de válvulas automáticas no Blow up Tank.	Processos	Eng. Danilo

Actividade a destacar

- **Manutenção de válvulas solenoides.**

Uma válvula solenoide é um dispositivo eletromecânico usado para controlar o fluxo de um líquido ou gás. Ela é composta por duas partes: um solenoide e uma válvula. O solenoide é uma bobina elétrica com um material ferromagnético móvel no centro da bobina, frequentemente chamado de "êmbolo". Quando uma tensão é aplicada à bobina, o solenoide é energizado. Essa ação cria um campo magnético que atrai ou repele o êmbolo, fazendo com que ele se desloque linearmente.



Figura 22: válvulas solenoides mais comum na TH ADM [Autor]

O movimento do êmbolo altera a posição dos componentes dentro do corpo da válvula para controlar o fluxo, a direção e a pressão específicos do fluido que passa pela válvula. Quando a corrente ou a tensão é removida da bobina, o campo magnético colapsa e todos os elementos internos retornam à sua posição desenergizada. Na TH ADM elas são na sua maioria usadas para comando dos atuadores electropneumáticos de funcionamento digital (on/off), comutando o ar nas entradas dos actuadores fechando ou abrindo as válvulas associadas.



Figura 23: Válvula solenoide acoplada no atuador pneumático [Autor]

Procedimento de manutenção

- Inspeção visual da bobina, se a bobina tem rachaduras ou marcas de queimadura. Não se deve energizar sem que esteja instalada para evitar queimar, como explicado em *Snowate*;
- Desmonta-se cuidadosamente a válvula, removendo o êmbolo, as vedações, as molas e os anéis;
- Limpa-se o corpo da válvula e todos os componentes internos com um pano limpo. Para sujeira acumulada, utiliza-se água corrente. Para componentes de borracha, pode se usar detergente diluído; para componentes metálicos, álcool isopropílico é uma opção, segundo o sítio Tameson;
- Inspeção dos componentes internos onde verifica-se as vedações (o-rings) quanto a inchaço, rachaduras ou deterioração, inspeciona-se também a haste e o interior da válvula em busca de arranhões ou desgaste;
- Substituição de quaisquer componentes que apresentem desgaste ou danos, como vedações rompidas;
- Remonta-se a válvula com todos os componentes no lugar e na posição correta.

Testes finais: Conecta-se novamente a energia e o ar, e verifica-se o funcionamento correto da válvula.

Tabela 7: Actividades realizadas na semana 3 [Autor]

Dia	Actividades	Área	Supervisão
09.06	Manutenção de cilindros pneumáticos de descarga de Bagaço.	Caldeiras	Itai Moyo
10.06	Identificação de cabos dos periféricos de entrada da BLR1 e projeção do circuito com flex I/O.	Caldeiras	Itai Moyo
11.06	Instalação de transmissor de nível no tanque de água quente.	Processos	Eng. Danilo
12.06	Manutenção dos actuadores de comunicação das painéis.	Processos	Eng. Danilo
13.06	Instalação de transmissor de brix na PAN3.	Processos	Eng. Danilo

Tabela 8 Atividades realizadas na semana 4 [Autor]

Dia	Actividades	Área	Supervisão
16.06	Manutenção de medidores e sonda de temperatura de aquecedores.	Processos	Eng. Danilo
17.06	Remoção e manutenção de válvula de vapor	Processos	Eng. Danilo
18.06	Manutenção, calibração e instalação de válvulas de nível de xarope.	Processos	Eng. Danilo
19.06	Desmontagem, manutenção e instalação das válvulas de injeção das PAN 5 a 8.	Processos	Eng. Danilo
20.06	Manutenção e montagem da válvula de vapor no aquecedor.	Processos	Eng. Danilo

Tabela 9 Atividades realizadas na semana 5 [Autor]

Dia	Actividades	Área	Supervisão
07.07	Instalação de sensores de temperatura no tail pipe.	Processos	Eng. Danilo
08.07	Instalação dos actuadores nas válvulas de admissão de vapor nos evaporadores.	Processos	Eng. Danilo
09.07	Manutenção e Calibração dos actuadores electro-pneumáticos (lineares).	Processos	Eng. Danilo
10.07	Comunicação dos periféricos do tanque de água quente com o PLC e teste de funcionamento.	Processos	Eng. Danilo
11.07	Instalação dos sensores indutivos nas centrífugas A7 e A8.	Processos	Eng. Danilo

Actividade a destacar

- **Manutenção e Calibração de actuadores electro-pneumáticos**

A manutenção preventiva regular pode evitar falhas e prolongar a vida útil do equipamento.

A. Verificação de vazamentos:

Inspeção das conexões de ar para verificar vazamentos. Isso pode ser feito usando uma solução de água com sabão, que criará bolhas na presença de um vazamento. Verificar as condições das vedações e tubulações.

B. Limpeza:

Mantenha a unidade e as linhas de ar limpas para evitar a entrada de contaminantes no conversor I/P, o que pode afetar a precisão, para o efeito é indispensável o uso de ar comprimido seco e filtrado para a alimentação pneumática.

Calibração de actuador eletropneumática (conversor I/P)

O objetivo da calibração é garantir que a saída de pressão corresponda precisamente ao sinal de entrada de corrente.

Equipamentos necessários

- Fonte de alimentação: Fornece um sinal de corrente de 4 a 20 mA com precisão.
- Fonte de ar comprimido: Fornece a pressão pneumática de acordo com a especificação do equipamento, com filtro regulador.
- Manômetro de precisão: Usado para medir a pressão de saída do conversor I/P.
- Ferramentas de ajuste: Chaves de fenda ou ferramentas específicas para os parafusos de ajuste de "zero" e "span" (alcance).

Na figura abaixo é mostrado um dos transdutores mais usado na TH ADM, cuja principal função é converter um sinal elétrico de entrada (corrente ou tensão) em uma pressão pneumática de saída proporcional, regulando uma pressão de suprimento de até 100KPa para uma pressão de saída



Figura 24: Um dos transdutores I/P em uso na TH ADM [Autor]

Procedimento de calibração

- i. Preparação:
 - Isolamento da energia elétrica e pneumática do equipamento;
 - Conecta-se a fonte de sinal de corrente (4-20 mA) e o manômetro de precisão ao conversor I/P assim como conecta-se também a fonte de ar comprimido;
 - Alimentação: Religa-se a alimentação elétrica e pneumática.

ii. Ajuste de zero (4 mA):

Aplicar um sinal de entrada de 4 mA.

A pressão de saída deve ser de 0 KPa. Se a leitura do manômetro for diferente, ajusta-se o parafuso de "zero" até que a leitura seja zero ou a pressão mínima esperada. O ajuste do zero move a curva de resposta em paralelo.

iii. Ajuste de span (20 mA):

Aplica-se um sinal de entrada de 20 mA.

A pressão de saída deve ser de 100 KPa. Se a leitura do manômetro for diferente, ajusta-se o parafuso de "span" até que a leitura seja 100 KPa. O ajuste do span altera a inclinação da curva de resposta.

iv. Repetição interativa:

Aplica-se novamente um sinal de 4 mA e verificar o ajuste de zero, o ajuste de span pode afetar o zero, sendo necessária uma nova correção repetindo os passos de ajuste de zero e span até que ambos os pontos (4 mA e 20 mA) estejam corretamente calibrados, isto é, 0KPa para 4mA e 100KPa para 20mA.

v. Verificação dos pontos intermediários:

Depois de calibrar o zero e o span, verificam-se os pontos intermediários, que devem ser automáticos em um conversor I/P bem ajustado:

8 mA: A pressão deve ser de 25 KPa.

12 mA: A pressão deve ser de 50 KPa.

16 mA: A pressão deve ser de 75 KPa.

Se os pontos intermediários não estiverem corretos, pode ser necessário repetir o procedimento de zero/span ou considerar um problema com o equipamento.

vi. Finalização:

Remover os equipamentos de teste.

Fechar as tampas de proteção e restaurar a operação normal do equipamento.

4. Descrição do Processo de Cozimento do Açúcar

4.1. Etapas do processo

- 1) Pré-aquecimento do xarope;
- 2) Admissão para a panela de vácuo;
- 3) Aplicação de calor e controlo do vácuo para reduzir o ponto de ebulição;
- 4) Concentração até o ponto de Brix alvo;
- 5) Arrefecimento e cristalização.

4.2. Interação entre variáveis

A Brix aumenta com a remoção de água por evaporação; a temperatura e pressão (vácuo) estão intimamente relacionadas pela curva de ebulição. O nível influencia a área de troca e o tempo de residência; o vácuo controla a temperatura de ebulição, afectando a cinética térmica.

4.3. Instrumentação e Variáveis de Processo

4.3.1. Brix

Medida: Refratómetros ópticos ou medidores de densidade. Os refratómetros contínuos (*inline*) fornecem saída em 4-20 mA ou via protocolo digital. A calibração deve ser feita com soluções padrão oscilando de 92,5% – 93,5% o valor de Brix desejado para a tomada de decisão.

Atuação/Controlo: Com base no Brix, o sistema ajusta a alimentação de xarope, a potência do aquecimento ou o tempo de retenção. Estratégias de controle podem incluir PID com *anti-windup* e lógica de saturação devido a restrições físicas. A imagem em seguida ilustra o fluxograma de funcionamento no controlo de brix, sendo Br_Pv a variável de processo e Br_Sp a variável de controlo (set point definido entre 92.5% à 93.5%).

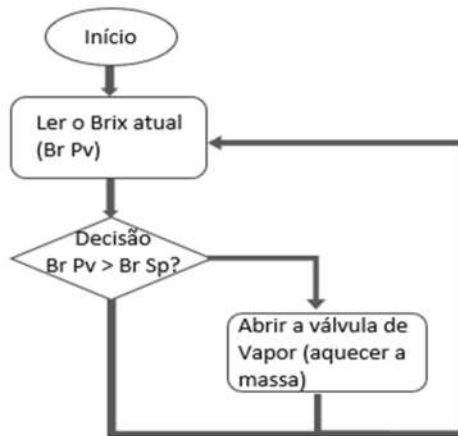


Figura 25: Fluxograma de funcionamento no controlo de brix. [Autor]

4.3.2. Temperatura

Medida: PT100 em ligação em 3 fios é recomendada para reduzir erro por cabo; termopares em pontos com resposta rápida. Saída: Transmissor 4-20 mA ou entrada directa no módulo analógico do CLP com isolamento, o valor de sejado na temperatura de cozimento pode variar de 65°C à 68°C.

Atuação: Válvulas de vapor modulante ou controlo de resistência eléctrica. A temperatura, em conjunto com a pressão (vácuo), define a taxa de evaporação; assim, controlos em cascata (vácuo > temperatura > potência) são efetivos. Na figura vem o fluxograma de controlo de temperatura. Sendo T_{Pv} variável de processo e T_{Sp} a referência.

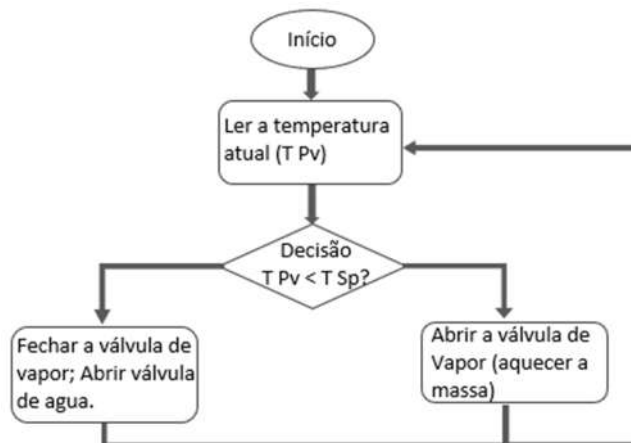


Figura 26: Fluxograma de controlo de temperatura. [Autor]

4.3.3. Pressão e Vácuo

Medida: Transmissores de pressão absoluta ou sensores de vácuo com faixa adequada (ex.: 0-1 bar absoluto). A seleção deve considerar compatibilidade com vapor e condensados. É comum usar transmissores com saída HART para diagnósticos avançados.

Atuação: Bombas de vácuo, válvulas de alívio e *bypass*. Controlos PID em malha de pressão/vácuo, frequentemente com acoplamento à malha de temperatura em configuração em cascata. O vácuo desejado para equilibrar a temperatura de cozimento varia de -84KPa à -86KPa.

4.3.4. Nível

Medida: Para líquidos com presença de espuma, radar guiado por onda ou sensores de radar modulados (*non-contact*) são mais fiáveis. Alternativas incluem medidores de pressão hidrostática com gás de protecção em aplicações com vapor.

Atuação: Bombas de alimentação, válvulas de descarga. O controlo de nível evita sobre enchimentos e garante tempo de residência adequado. A imagem em seguida ilustra o fluxograma de funcionamento no controlo de nível, sendo L_{Pv} a variável de processo e L_{Sp} a variável de controlo (*set point*).

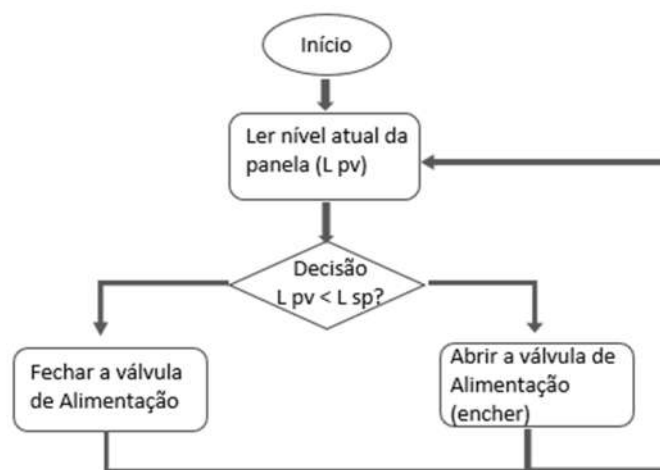


Figura 27 o Fluxograma de controlo de nível. [Autor]

4.4. Estratégias de Controlo e Migração

4.4.1. Controlo PID e *tuning*

O controlador PID continua a ser a base pela sua robustez e simplicidade. Para o *tuning* recomenda-se procedimentos empíricos como Ziegler–Nichols ou métodos de sintonia

baseada em modelos (Cohen–Coon) quando se dispõe do modelo dinâmico. Em processos com atraso significativo, pode ser útil adotar controladores com Smith Predictor ou aplicar filtragem para reduzir ruído na medida de Brix.

4.4.2. Controlo em cascata e multivariável

Devido à interdependência das variáveis, esquemas em cascata (ex.: nível -> Brix; vácuo -> temperatura) e controladores multivariáveis (MPC) podem melhorar o desempenho. O MPC otimiza acções de controlo considerando restrições e acoplamentos entre variáveis, reduzindo *overshoot* e melhorando estabilidade.

4.4.3. Planeamento da migração

O plano de migração deve incluir: levantamento dos instrumentos existentes, análise de falhas, desenho da nova arquitectura, projecto de I/O do CLP, programação das funções de controlo, integração com SCADA/IHM, e testes FAT/SAT. Recomenda-se implementação faseada: primeiro aquisição de dados, depois controlo manual assistido, e por fim controlo automático pleno.

4.5. Implementação Prática: Arquitectura e Programação

4.5.1. Arquitectura proposta

A arquitectura baseia-se num CLP modular com módulos analógicos isolados para entradas de sensores (4-20 mA, RTD), saídas digitais e analógicas para actuadores, com comunicação Ethernet para o nível supervisor SCADA/Histórico. A IHM local apresenta gráficos de tendência, alarmes e comandos de *override*.

4.5.2. Especificações de I/O

- Entradas analógicas: Brix (4-20 mA), Temperatura (RTD/PT100 via transmissor), Pressão (4-20 mA), Nível (4-20 mA ou HART);
- Saídas analógicas: Válvula de vapor (4-20 mA), Válvula de controlo de vácuo;
- Entradas digitais: sensores de nível alto/baixo, estados de bomba;
- Saídas digitais: comandos da válvula de descarga (0 - 24V), válvula de alimentação, alarmes e *interlocks*.

4.5.3. Lógica de controlo e blocos funcionais

Sugere-se modularizar a programação em blocos: leitura e filtragem de sinais, calibração automática, blocos PID com anti-*windup*, lógica de *interlocks* de segurança, rotina de purga e rotina de arranque/paragem segura.

4.6. Lista de material necessário

Para a materialização do projecto da migração os materiais necessários estão todos disponíveis na TH-ADM, grosso parte deles em perfeitas condições sendo alguns necessitando de uma pequena manutenção, tornando o custo de implementação reduzido para a fabrica. Eis a lista dos materiais necessários listados na tabela a seguir.

Tabela 10: Material necessário [Autor]

Material	Quantidade	Disponibilidade na TH-ADM
Atuador de Descarga 200	1	Disponível na TH-ADM
Atuador de Alimentação 100	1	Disponível na TH-ADM
Atuador de Vapor 6	1	Disponível na TH-ADM
Atuador de Água 6	1	Disponível na TH-ADM
Transdutores I/P	2	Disponível na TH-ADM
Válvulas Solenoides com L de 24V	2	Disponível na TH-ADM
Transmissor de pressão para nível	2	Disponível na TH-ADM
PT100	1	Disponível na TH-ADM
Transmissor de temperatura	1	Disponível na TH-ADM
Medidor de brix (Digitrans)	1	Disponível na TH-ADM
PLC	1	Disponível na TH-ADM
Cabo de 16pares	50m	Disponível na TH-ADM

5. Considerações finais

5.1. Conclusões

A olhar pelas actividades realizadas na TH-ADM durante o estágio, pode-se sem equívoco concluir que o estágio permitiu a aplicação e validação dos conceitos teóricos de engenharia/automação aprendidos na academia, com foco na participação no comissionamento do sistema de controle dos moinhos que permitiu a consolidação dos conhecimentos em malhas de controle PID, transformando conceitos abstratos em expertise operacional tornando-se um ganho pessoal.

O contato direto com Transmissores HART, foi crucial, conferindo competência na configuração, calibração e diagnóstico das falhas de funcionamento dos Transmissores de pressão, nível, temperatura bem como mais elementos associados ao processo de produção de açúcar.

O trabalho em conjunto com a equipa de instrumentação e operadores dos moinhos no processo da automação dos moinhos aprimorou a capacidade de comunicação técnica, um benefício essencial para o gerenciamento eficaz de projetos de automação.

O design da arquitetura do sistema foi concluído com sucesso, definindo os módulos essenciais e a interface de usuário detalhada, atendendo a todos os requisitos funcionais e não-funcionais estabelecidos.

Devido a restrições temporais/orçamentárias inerentes ao escopo desta fase do projeto, a implementação do protótipo funcional não pôde ser integralmente realizada, no entanto, o projeto está em um estado que permite a transição imediata para a fase de desenvolvimento, com riscos significativamente mitigados pela modelagem detalhada.

A fase de design foi concluída, fornecendo a documentação técnica necessária para uma implementação eficaz como o foco do trabalho futuro.

5.2. Recomendações

Para a materialização do protótipo, recomenda-se a alocação de um novo prazo para a conclusão da fase de implementação, utilizando o projeto arquitetônico e a documentação detalhada já desenvolvidos neste relatório como ponto de partida imediato.

Recomenda-se um estudo aprofundado sobre a compatibilidade e integração dos equipamentos legados (atuais) com o software e a arquitetura propostos. Isso pode envolver o desenvolvimento de drivers de comunicação ou módulos de adaptação de sinal (interfaces) de baixo custo, visando o reuso e a minimização de investimento.

Alternativa de Custo: Sugere-se a avaliação de plataformas de prototipagem de baixo custo (ex.: microcontroladores ou CLPs educacionais) como substitutos temporários para os componentes mais caros ou obsoletos, permitindo a validação da lógica de controle antes da integração com o hardware final.

Para o pleno desempenho dos equipamentos atuais recomenda-se a execução de uma calibração completa e uma análise de ciclo de vida dos equipamentos a serem utilizados. Isso é crucial para determinar o desvio máximo aceitável e se os componentes existentes podem atender aos requisitos de precisão do novo sistema.

Sugere-se o aprofundamento da pesquisa sobre técnicas avançadas de controle para substituir os algoritmos de controle básicos, com o objetivo de aumentar a eficiência e a adaptabilidade do sistema a perturbações não lineares no processo.

No que concerne a viabilidade econômica da continuidade ao projeto, recomenda-se a elaboração de um estudo de viabilidade técnico-econômica que compare o custo de *retrofit* (reforma/atualização de equipamentos existentes) versus a aquisição de equipamentos novos, justificando o investimento necessário para a próxima fase.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] MACHADO, S. S. Tecnologia da fabricação do açúcar. Inhumas – GO: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG-Inhumas, 2016.

[2] Distribuidora Nacional de Açúcar. (2022). *Informação sobre Açúcar*. Maputo. FAO. (2022). *FAOSTAT*. Obtido em 22 de Jun de 2025, de FAO: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>

[3] Braga, A. L., Santos, L. A. dos, Chaparro, M. de M., Pedrini, A. L., Almeida, T. A. de, Pereira, A. R., ... Melo, C. A. de A. (2024). Monitoramento de variáveis em nuvem em centrifugas de açúcar. *Revista Brasileira De Mecatrônica | Brazilian Journal of Mechatronics*, 6(3), 32–52. Disponível em: <https://doi.org/10.62899/revistabrmecatronics.v6i3.250>

[4] SUGAR MILLING RESEARCH INSTITUTE. Continuous pan boiling. In: TEN WEEK COURSE IN SUGAR ENGINEERING. Durban, South Africa: University of Natal, [s.d.].

[5] Gangwar, L., Solomon, S., Singh, P., Hasan, S., & Sah, K. (2014). *Socio-economic Impact of Sugarcane Production and Diversification in India*. India: Indian Institute of Sugarcane Research.

[6] SUGAR MILLING RESEARCH INSTITUTE. Basic Concepts. In: TEN WEEK COURSE IN SUGAR ENGINEERING. Durban, South Africa: University of Natal, [s.d.].

[7] SNOWATE. Manutenção de válvulas solenoides. [S.d.]. Disponível em: <https://www.snowate.com/pt/parts/solenoid-valve/supports/solenoid-valve-maintenance>. Acesso em: 10 out. 2025.

[8] Foster DH, Sockhill BD, Wright PG (1960) Variations of supersaturation coefficient in high grade boilings. *Proceedings of the Queensland Society of Sugar Cane Technologists* 27: 111-120.

[9] SUGAR PROCESS TECH. Crystallizers Application in Sugar Industry | Crystallizer Capacity Calculation. 2025. Disponível em: <https://www.sugarprocesstech.com/crystallizer/>. Acesso em: 15 out. 2025.

[10] OGATA, Katsuhiko. *Modern Control Engineering*. 5. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2010.

[11] PINTO, G.L. 1990. Fabricação de rapadura e açúcar batido. Conselho de Extensão. Universidade Federal de Viçosa, Informe Técnico no. 65. 9p.

[12] SILVEIRA, A.H. *Produtos da cana*. 2a. Ed. São Paulo, Melhoramentos, s.d. 31p.

[13] RIBEIRO, R.D., WALTON, C.F., VENTRE, E.K., McALIP, M.A. & FORT, A.A. Fabricação de melado. In "Grande manual global de agricultura, pecuária e receituário industrial. Porto Alegre, Globo, 1978. P21-48. V.6.

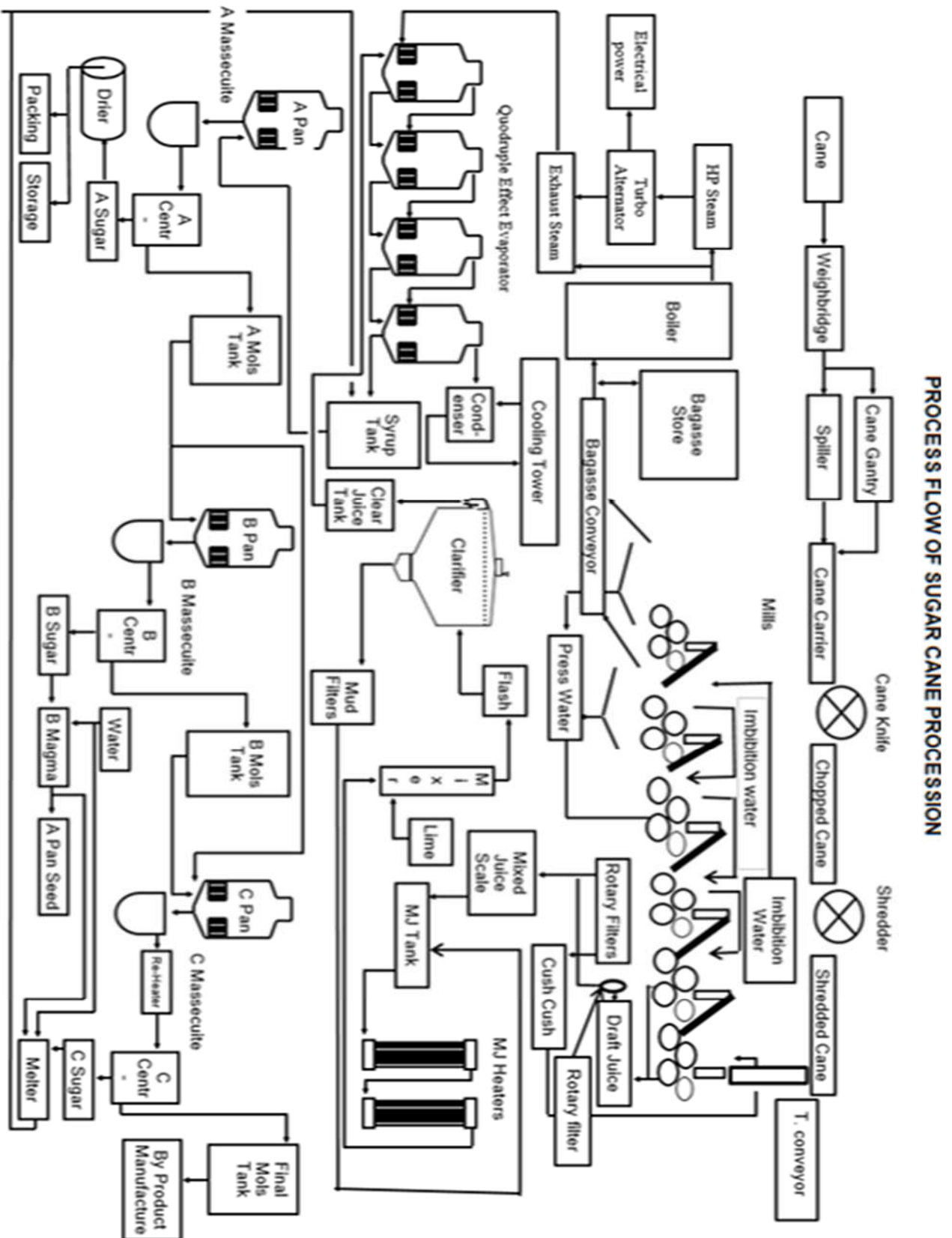
[14] CRUZ, S. H. da. Processos de Moagem e Difusão para a extração do caldo da cana-de-açúcar. 2017. Apresentação de slides. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/extrao-caldo/254474116>. Acesso em: 10 out. 2025.

[15] Yokogawa Electric Corporation. (2023). EJA210E Flange Mounted Differential Pressure Transmitter (General Specifications No. GS 01C31C01-01EN, 20th ed.). Tokyo, Japan: Yokogawa.

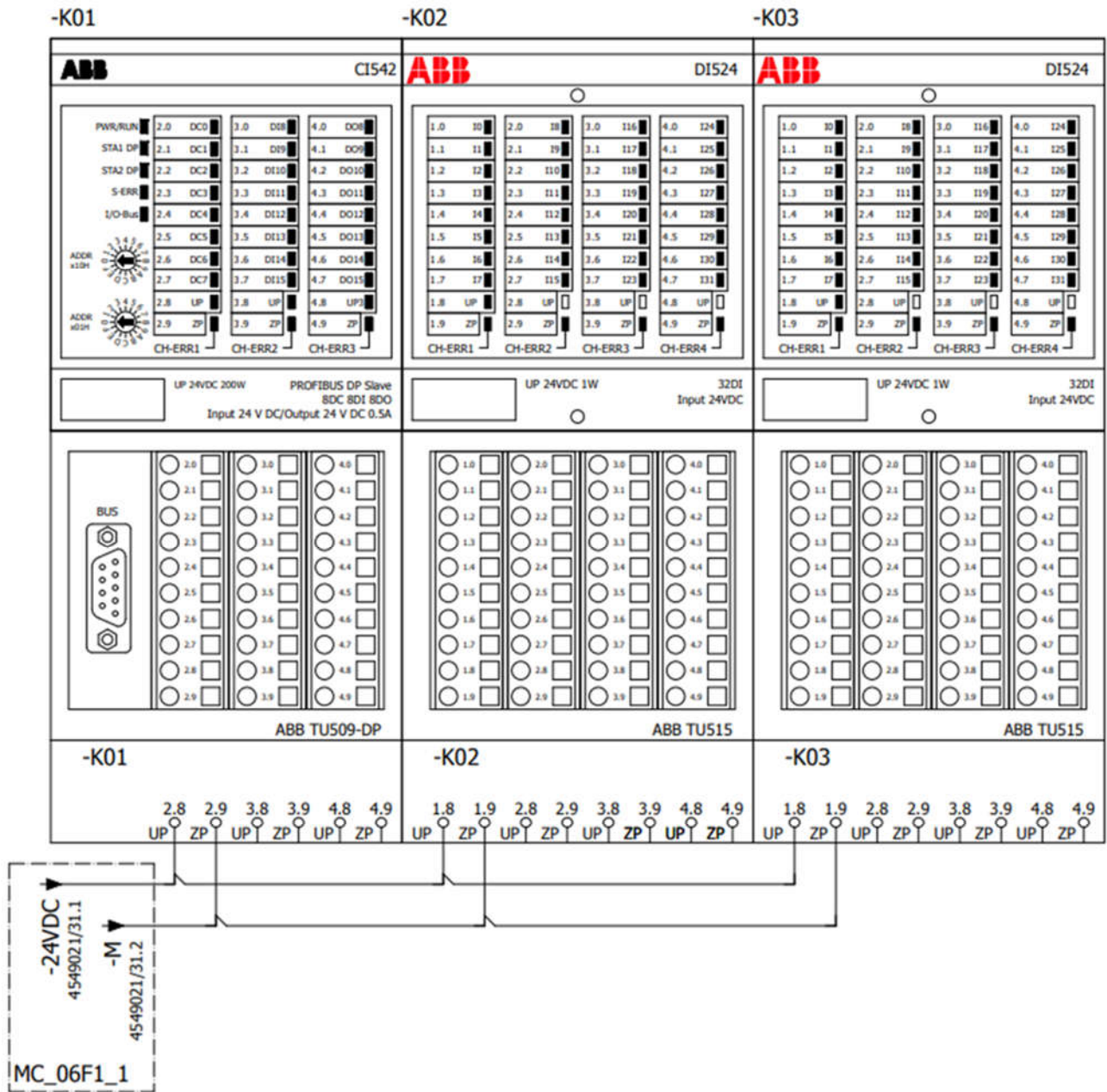
[16] YOKOGAWA ELECTRIC CORPORATION (2016). GS 01C50H01-01EN: YTA610 Temperature Transmitter. Tokyo, Japan 2016.

7. Anexos

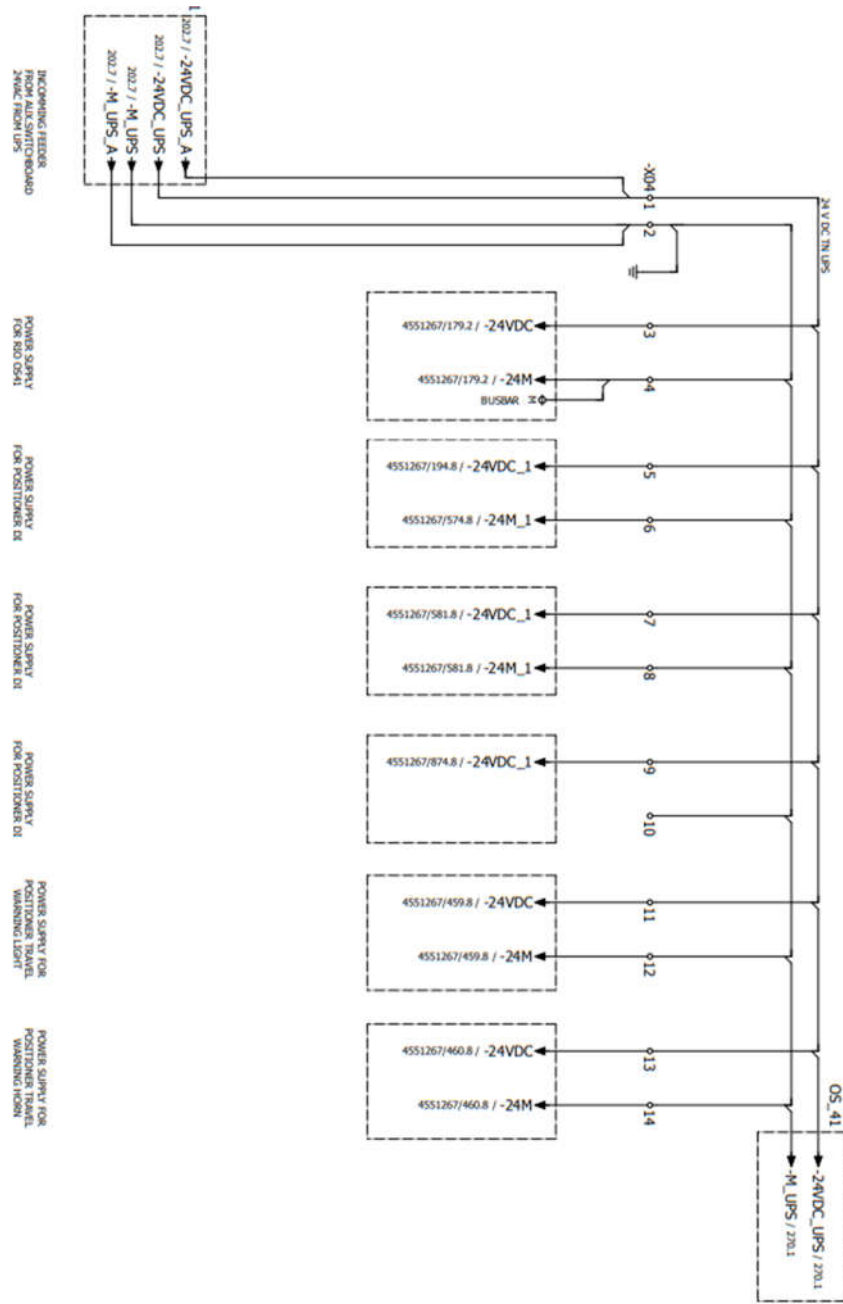
7.1. Planta dos Processos da TH-ADM



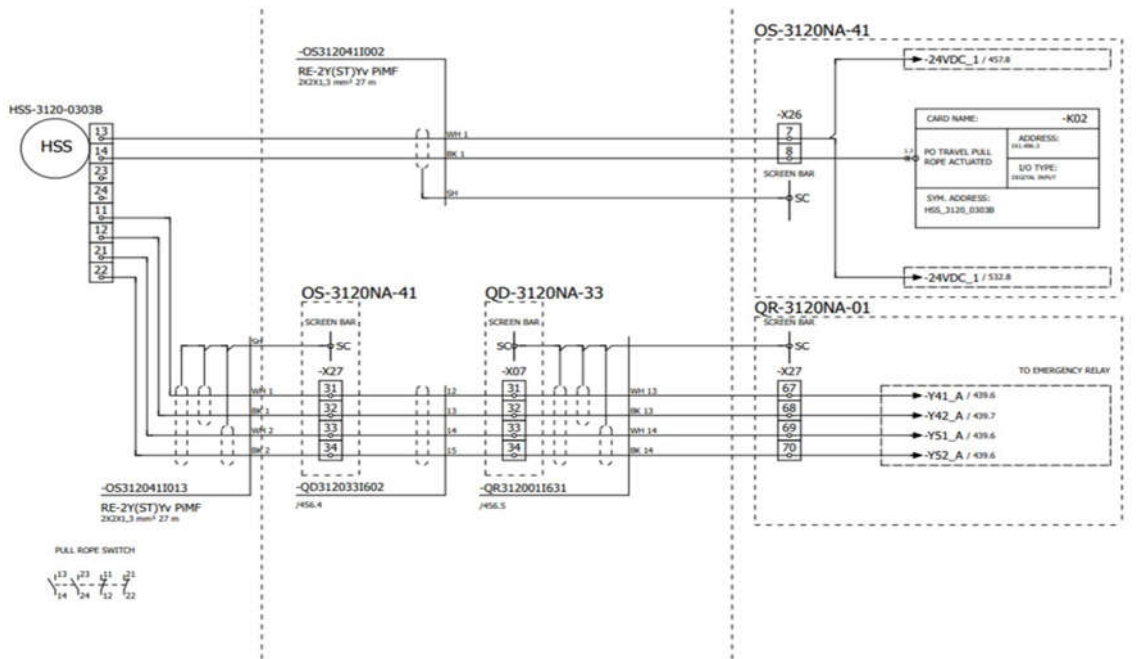
7.2. Características gerais do PLC.



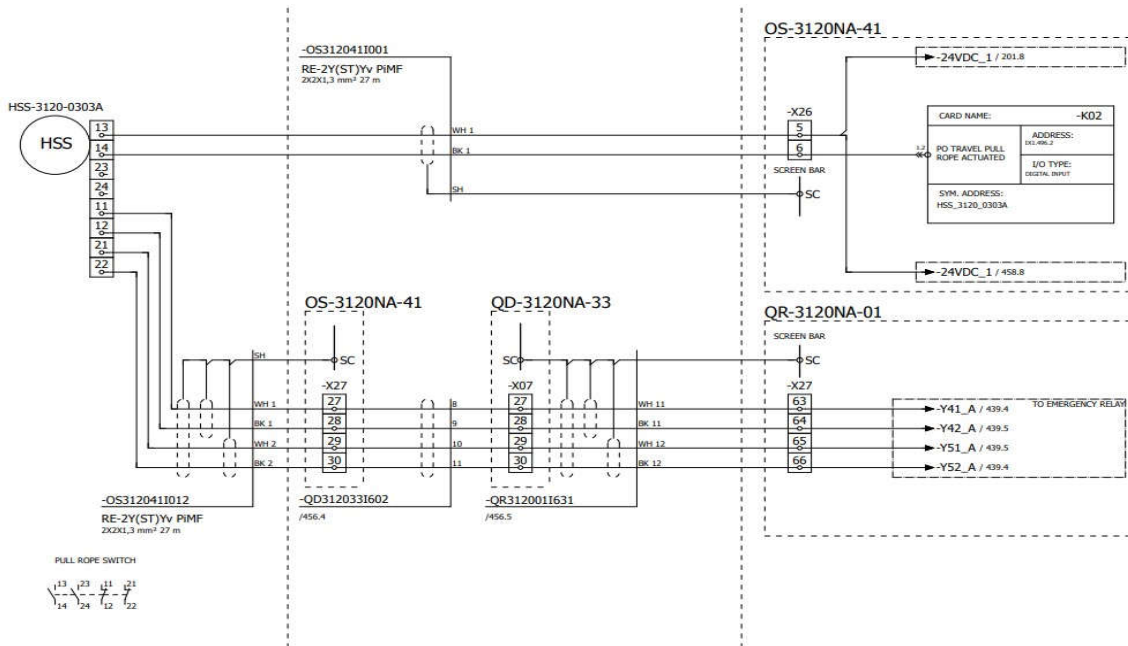
7.3. Diagrama eléctrico de Fonte de Alimentação.



7.4. Diagrama eléctrico de conexões com a carta digital e o relê.



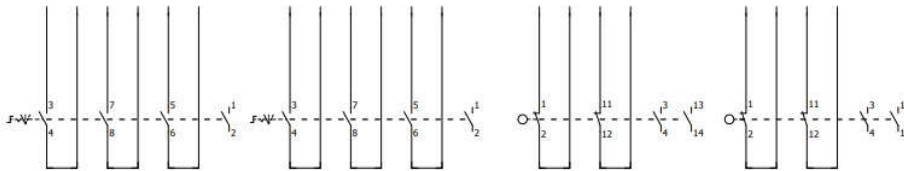
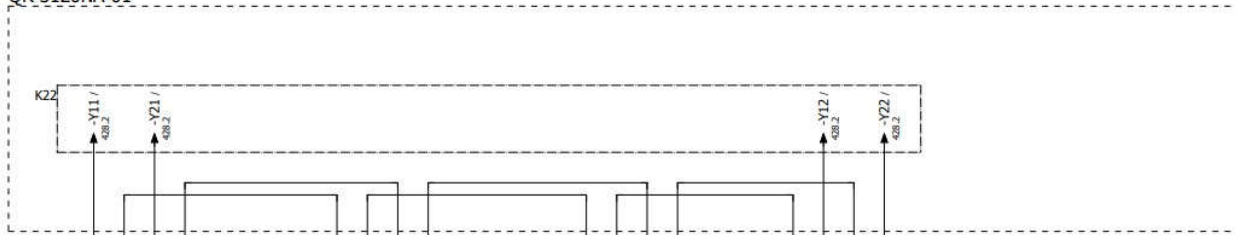
459



458

7.5. Diagrama de conexões com o relê.

QR-3120NA-01



OS-3120NA-31
HS-3120-0391A
DISABLE-ENABLE SELECTOR

OS-3120NA-41
HS-3120-0391B
DISABLE-ENABLE SELECTOR

HSS-3120-0303A
FULL ROPE
SWITCH

HSS-3120-0303B
FULL ROPE
SWITCH