STAB
Regional Sul

Integração Etanol Cana / Milho



FERNANDO CULLEN SAMPAIO

Engenheiro Químico (Unicamp)

Experiência de mais de 40 anos no setor sucroenergético, começou a carreira no CTC (de 1984 a 1999), com passagem pela Zilor, consultoria (12 anos) e hoje na São Martinho

25º SBA
Seminário Brasileiro Agroindustrial
A Usina da Recuperação

Gerente de Tecnologia e Processos Industriais – São Martinho

21 e 22 / Outubro / 2026

São Martinho

STAB
Regional Sul

Integração Etanol Cana / Milho



GUILHERME FRAGA

Engenheiro Controle e Automação

Mais de 10 anos de experiência no setor sucroenergético, focado em transformação digital para geração de valor

25º SBA
Seminário Brasileiro Agroindustrial
A Usina da Recuperação

Especialista de Processos Industriais – São Martinho

21 e 22 / Outubro / 2026

São Martinho



USINA DE ALTO DESEMPENHO

- Tecnologia e Integração energética
- Destilação a Vácuo
- Indústria 4.0 – Desafios vencidos

INTEGRAÇÃO ETANOL CANA / MILHO – CASE SÃO MARTINHO

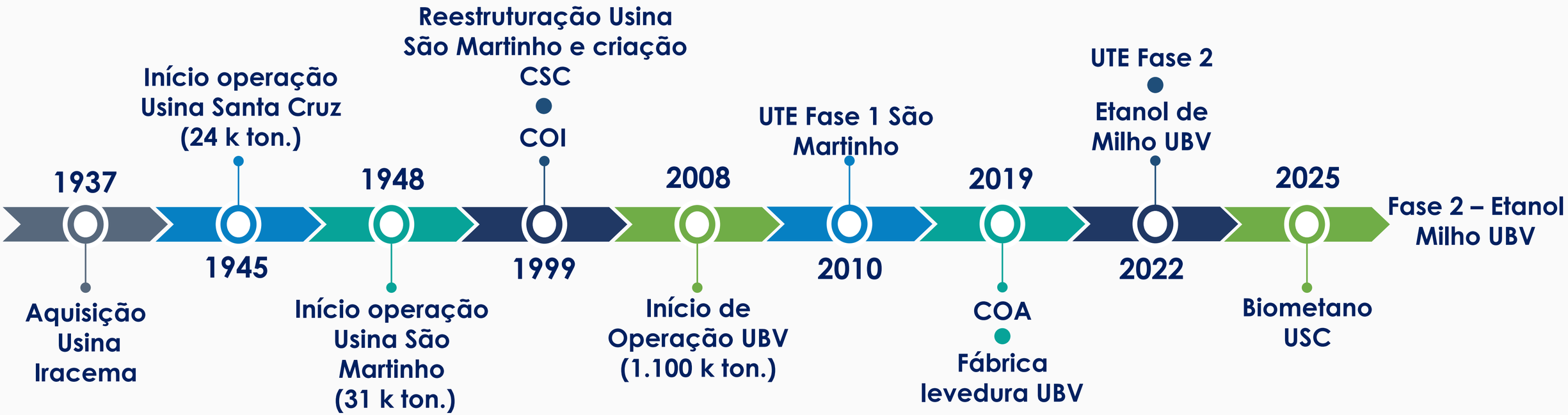
Momento Sou Seguro

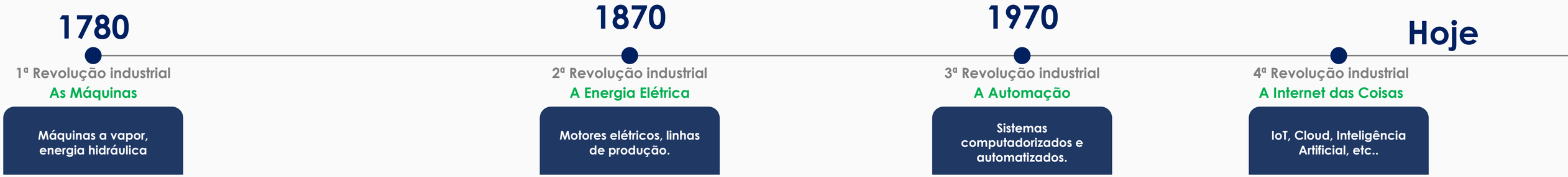
Juntos, **nós podemos transformar** o nosso futuro

sou seguro

São Martinho

Conhecendo a nossa história





Visão Geral da Companhia

Ativos sob gestão	**4 unidades**
Colaboradores	**~12,700**
Capacidade de Produção[1]	
Capacidade de moagem	27,0 mi tc
Moagem de cana-de-açúcar	24,5 mi tc
Moagem equivalente de milho	2,5 mi tc (500 k tm)
Açúcar	1,7 mi t
Etanol	1,3 bi lt
Cogeração	1,1 TWh
% Cana própria/Cana de terceiros	**70%/30%**
Terra Própria	**55,000 hectares**
Índice de Mecanização[2]	**100%**



350,000 ha
Sob gestão
(cana própria + cana de terceiros)

~46%/54% mix
(Máx. açúcar)
~36%/64% mix
(Máx. etanol)

Agricultura de Ultraprecisão
Pioneirismo em Automação e Conectividade

Grau de Investimento
S&P Global

~R$ 6 bi Valor de Mercado
(outubro/2026)

1 – Considerando capacidade máxima de açúcar ou etanol e milho; 2 – Considerando as operações de colheita, transporte e carregamento.





Projeto Milho - Fase 1 - UBV

Premissas do Projeto Fase 1 do Milho

Planta anexa

330 dias de operação por ano

integração energética cana / milho:

500ktm/ano (1.500tmd)

ZERO BIOMASSA COMPLEMENTAR

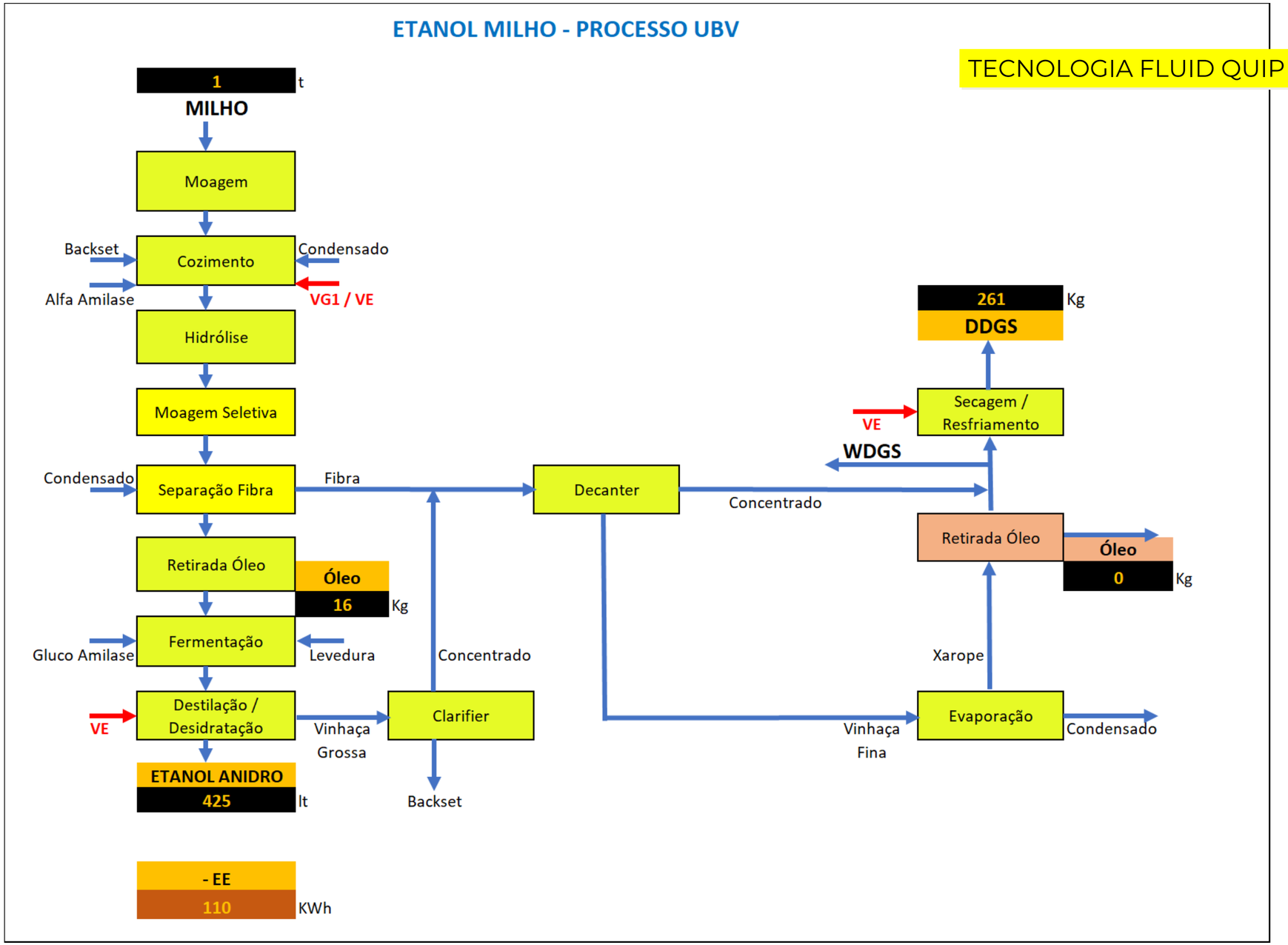
cana fornecendo as utilidades para cana e milho



Diretrizes:

- Sem instalação de caldeira adicional
- Utilização, exclusivamente, de VE e/ou VG1 no processo milho
- Manter captação de água, atendendo os 2 processos
- Autossuficiência em Energia elétrica, mantendo contratos de venda vigentes

Fluxograma Processo – Etanol Milho – UBV – FASE 1



Utilidades: Vapor / EE / Água – 1.500tmd – Fase 1

Vapor

2,73Kg/lt anidro ⇔ 1,16t/tm ⇔ **72,5t/h**

Energia Elétrica PLANTA MILHO

110KWh/tm ⇔ 0,26KWh/lt anidro – **6,9MW**

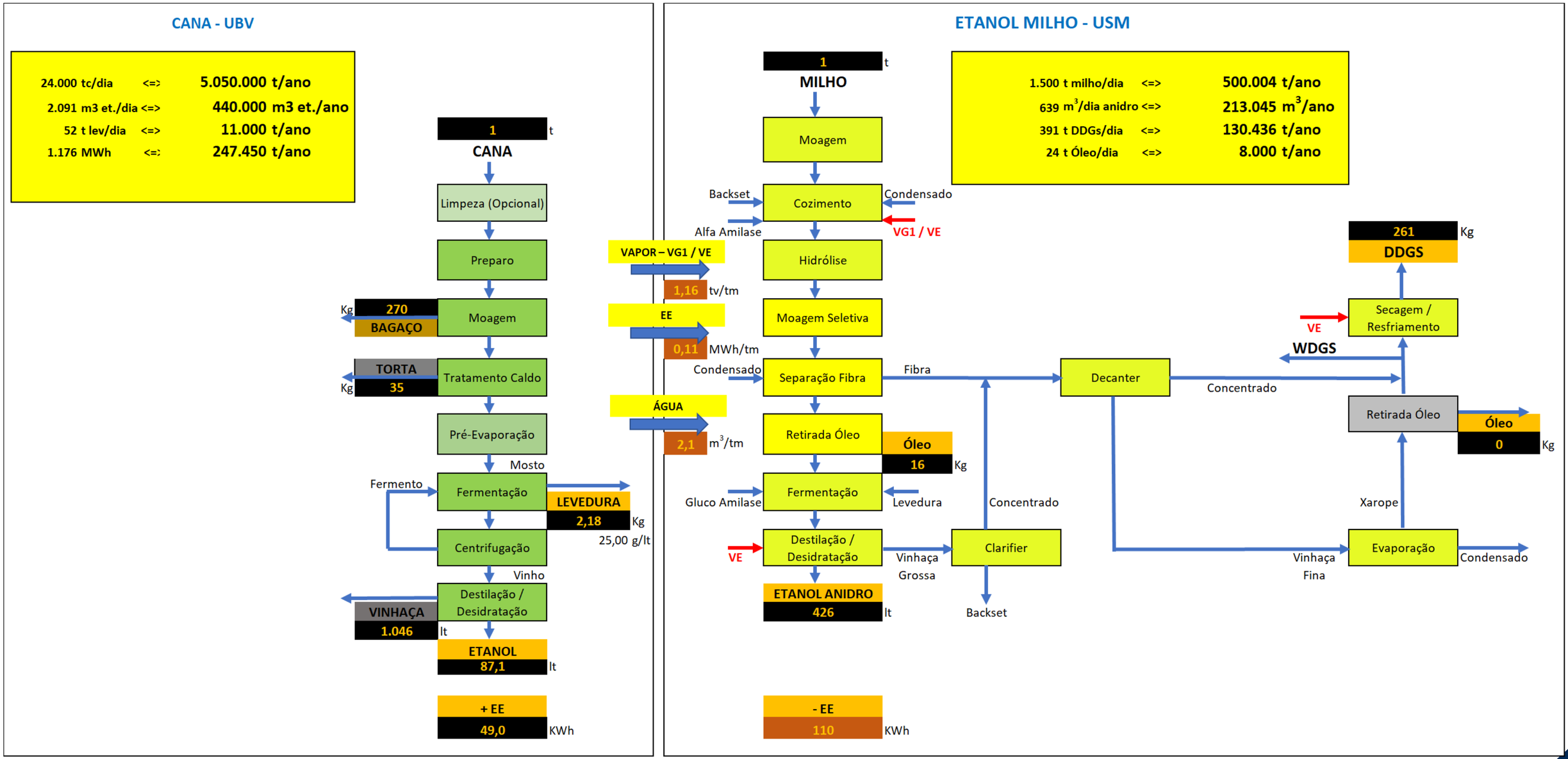
Energia Elétrica ARMAZENAGEM MILHO

1MW (média no ano – 0,44 a 1,42MW)

Água

~130m³/h ⇔ 2,1m³/tm (limpezas, reposições e torre de resfriamento)

Integração Processos Cana / Milho – Fase 1



ADEQUAÇÕES / ESTRATÉGIAS:

- Transformação caldeira grelha Pin Hole -> Leito Fluidizado
- Planta EtOH milho com utilização de VE e VG1 apenas e com baixo consumo
- Gerenciamento da rotina – PGDI Cana / Milho
- Otimização energética e hídrica no processo da cana
- Estratégias manutenção, na utilidades, em apenas 30 dias

Retrofit Caldeiras / Leito Fluidizado

Quadro comparativo

	Leito	Grelha
Umidade admissível para queima	65%	53%
Eficiência de combustão (50% umidade)	99,5%	94 a 97%
Poder calorífico admissível, PCI	> 1.250 kcal/kg	> 1.600 kcal/kg
Eficiência ao PCI	91,9%	88,6%
Níveis de emissões atmosféricas	Padrões nacionais e internacionais	Padrões nacionais
Operação	Muito estável	Estável

Objetivos

- Redução do **consumo de bagaço** em **9%**
- Aumento em **10%** da **produção de vapor** (250t/h para 275 t/h)
- Operação durante **330 dias/ano** (**Etanol de milho**)

Fluidização/ Queimadores de partida



ALGUNS INVESTIMENTOS / ADEQUAÇÕES / ESTRATÉGIAS:

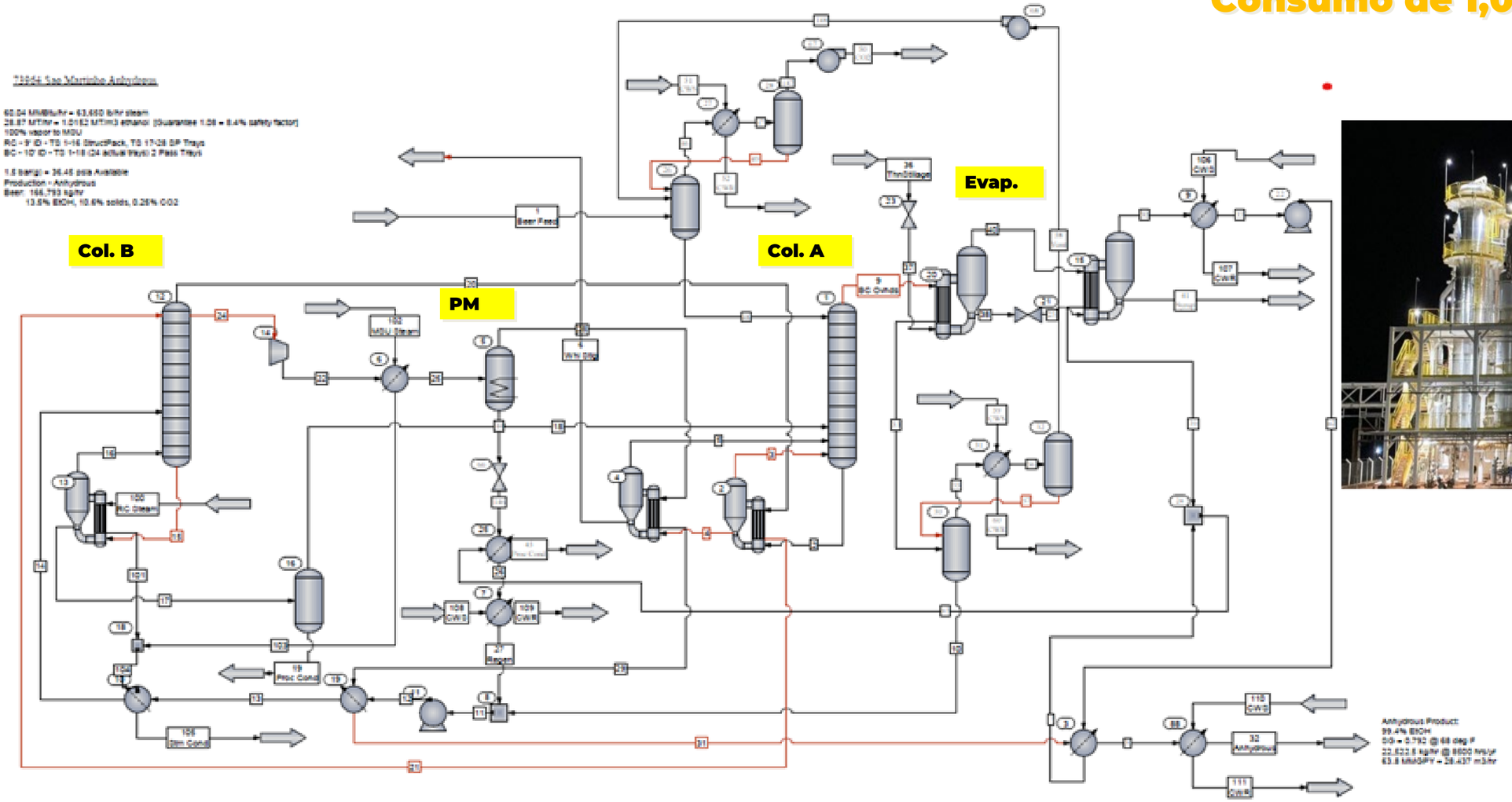
- Transformação caldeira grelha Pin Hole -> Leito Fluidizado
- Planta EtOH milho com utilização de VE e VG1 apenas e com baixo consumo
- Gerenciamento da rotina – PGDI Cana / Milho
- Otimização energética e hídrica no processo da cana
- Estratégias manutenção, na utilidades, em apenas 12 dias

Balanço Energético Industrial – Otimizações – Destaques – F1

❑ **Destilação do Milho** – Projeto TKE / FQT (destilação, desidratação e evaporação):

Soluções inovadoras:

Consumo de 1,07Kgv (VE) / lt anidro





Balanço Energético Industrial – Otimizações – Destaques – F1

❑ Secagem DDGs – Projeto Quand (Chinesa):



- **Utiliza VE**
- Seca WDGs (Fibra, bolo úmido e xarope) – aprox. 66% umidade a 11% de umidade (DDGS)
- Feixe tubular rotativo (Bundle Dryer)
- Resfriamento do DDGS no final - < 45ºC

ALGUNS INVESTIMENTOS / ADEQUAÇÕES / ESTRATÉGIAS:

- Transformação caldeira grelha Pin Hole -> Leito Fluidizado
- Planta EtOH milho com utilização de VE e VG1 apenas e com baixo consumo
- Gerenciamento da rotina – PGDI Cana / Milho e Controles Avançados
- Otimização energética e hídrica no processo da cana
- Estratégias manutenção, na utilidades, em apenas 12 dias

ALGUNS INVESTIMENTOS / ADEQUAÇÕES / ESTRATÉGIAS:

- Transformação caldeira grelha Pin Hole -> Leito Fluidizado
- Planta EtOH milho com utilização de VE e VG1 apenas e com baixo consumo
- Gerenciamento da rotina – PGDI Cana / Milho e Controles Avançados
- Otimização energética e hídrica no processo da cana
- Estratégias manutenção, na utilidades, em apenas 12 dias

ALGUNS INVESTIMENTOS / ADEQUAÇÕES / ESTRATÉGIAS:

- Transformação caldeira grelha Pin Hole -> Leito Fluidizado
- Planta EtOH milho com utilização de VE e VG1 apenas e com baixo consumo
- Gerenciamento da rotina – PGDI Cana / Milho e Controles Avançados
- Otimização energética e hídrica no processo da cana
- Estratégias manutenção, na utilidades, em apenas 35 dias (fase 1)

Premissas do Projeto Fase 2 do Milho

Planta anexa

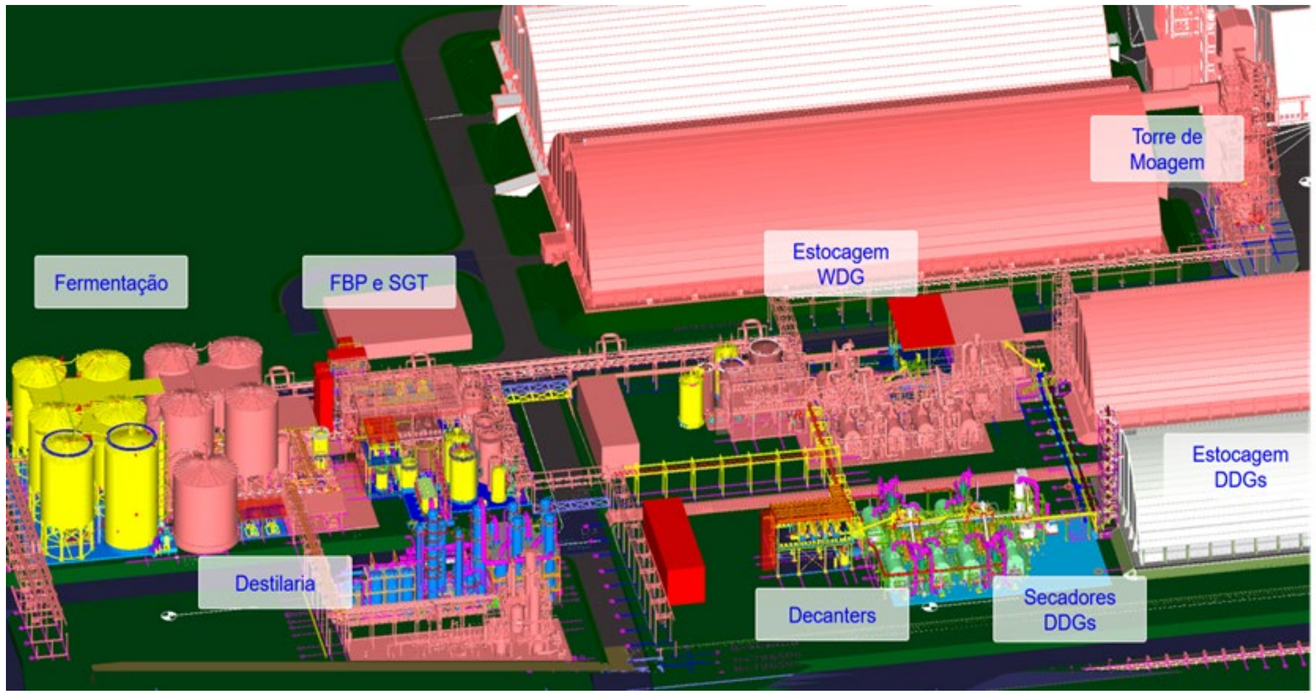
353 dias de operação por ano

integração energética cana / milho:

1.150ktm/ano (3.400tmd)

ZERO BIOMASSA COMPLEMENTAR

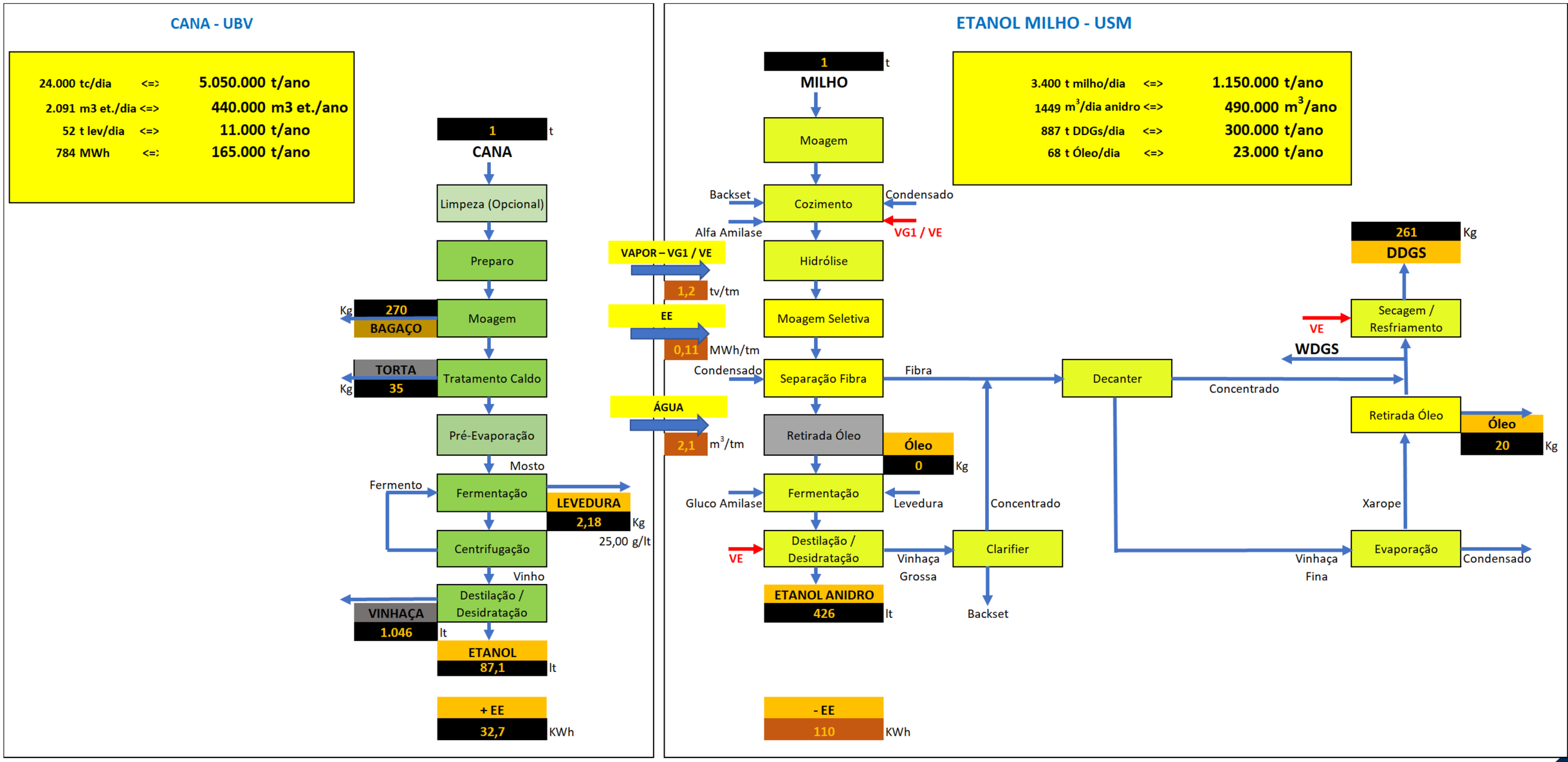
cana fornecendo as utilidades para cana e milho



Diretrizes:

- Sem instalação de caldeira adicional
- Utilização, exclusivamente, de VE e/ou VG1 no processo milho
- Manter captação de água, atendendo os 2 processos
- Autossuficiência em Energia elétrica, mantendo contratos de venda vigentes

Integração Processos Cana / Milho – Fase 2 (aprovado em 2025)



Utilidades: Vapor / EE / Água – 3.400tmd – Fase 2

Vapor

2,82Kg/lt anidro ⇔ 1,20 t/tm ⇔ **170 t/h**

Energia Elétrica PLANTA MILHO

110 KWh/tm ⇔ 0,27 KWh/lt anidro – **15,6MW**

Energia Elétrica ARMAZENAGEM MILHO

1MW (média no ano – 0,44 a 1,42 MW)

+ 2,2MW (externo)

Água

~295m³/h ⇔ 2,10 m³/tm (limpezas, reposições e torre de resfriamento)

Balanço Energético Industrial – Otimizações - Destaques

❑ Destilação da Cana – Projeto Exal (destilação a vácuo):

Soluções inovadoras:

Redução de **2,60 p/ 1,52Kgv (VG1)** / lt hidr.
No pico de produção (2.400m^3/dia) – **redução de 108tv/h de VG1** no consumo de processo

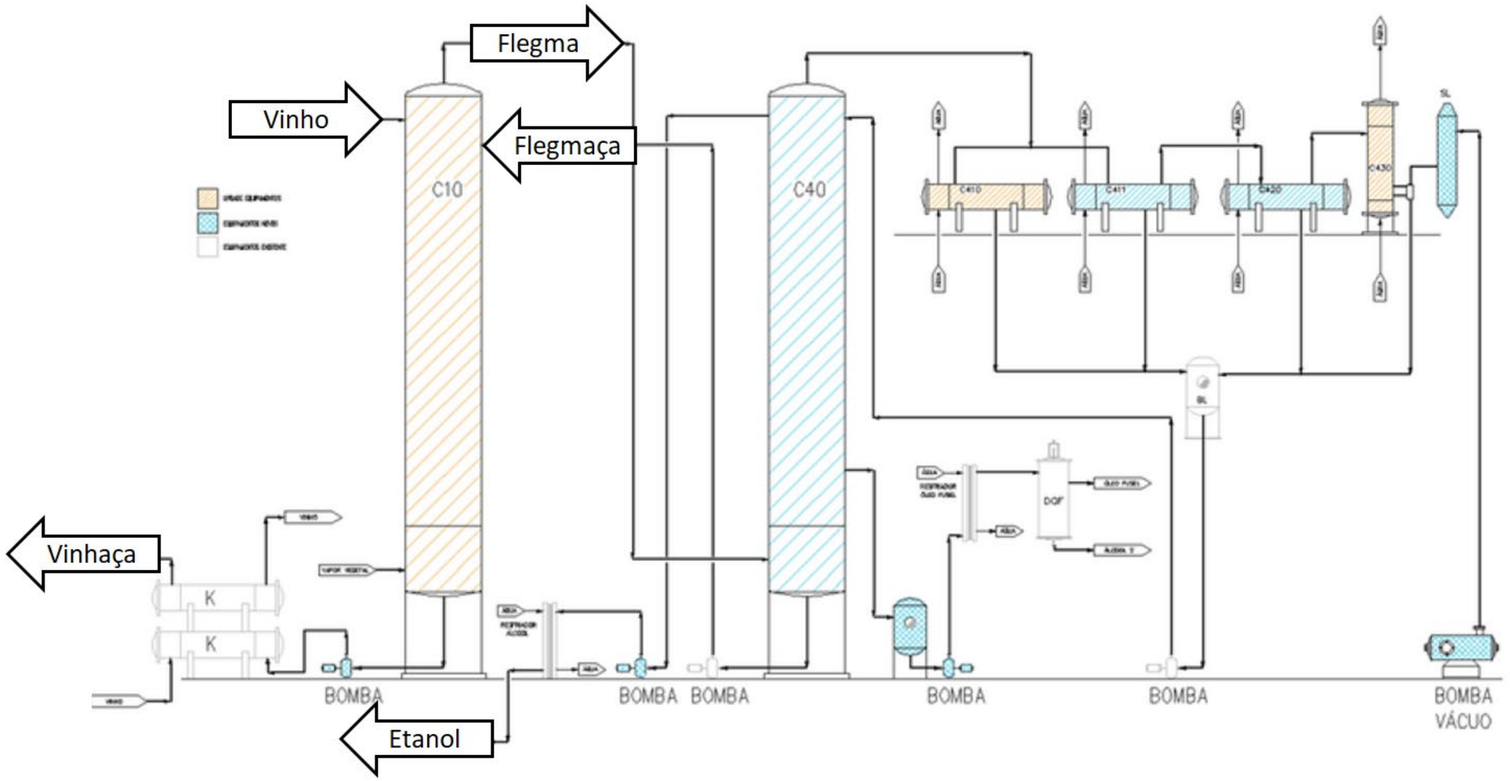


Figura 06 Croqui Fluxograma



NOVOS UPGRADE

Destilação à Vácuo – Redução Consumo de Vapor

- O vácuo não cria energia, reduz temperaturas (hidratado, vinhaça, incondensáveis e voláteis...)
- Flegstil – aproveita parte da energia da flegmaça
- Reduz a razão de refluxo (projeto coluna B)
- Elimina colunas A1, D e condensadores R e R1
- Maior regeneração para aquecimento do vinho



COMPARATIVO OPERACIONAL – DESTILAÇÃO ATM x DESTILAÇÃO A VÁCUO (DVT)

REDUÇÕES OPERACIONAIS E GANHOS OBTIDOS

PARÂMETRO	COLUNA - A ATM	COLUNA - A DVT	COLUNA - B ATM	COLUNA - B DVT	% DE GANHO (DVT vs ATM)
Temperatura Base (°C)	111°C	94°C	103°C	80°C	A: 15,3% B: 22,3%
Pressão Base (bar abs)	1,60 bar	-0,15 bar	1,49 bar	-0,37 bar	A: 109,4% B: 124,8%
Temperatura Topo (°C)	103°C	80°C	81°C	60°C	A: 22,3% B: 25,9%
Pressão Topo (bar abs)	1,48 bar	-0,37 bar	1,20 bar	-0,50 bar	A: 125,0% B: 141,7%
Carga Térmica para Sistema de Refrigeração	–	↓ 29,0%	–	↓ 31,0%	A: 29,0% B: 31,0%
Consumo de Água de Refrigeração	–	↓ 28,0%	–	↓ 30,0%	A: 28,0% B: 30,0%

MAIOR EFICIÊNCIA, MENOR CONSUMO DE RECURSOS E MENOR IMPACTO AMBIENTAL. GANHOS QUE GERAM RESULTADOS.

Destilação à Vácuo – Resultados



DESEMPENHO ENERGÉTICO DA DESTILAÇÃO – SISTEMA FLEGSTIL® A VÁCUO

COMPARAÇÃO EXAL x UBV (DESTILAÇÃO ATM)

°GL	EXAL PROJETO	EXAL REALIZADO	UBV ANTES (ATM)	DELTA DE CONSUMO EXAL REALIZADO x UBV ANTES (ATM)	DELTA DE CONSUMO EXAL PROJETO x UBV ANTES (ATM)	DELTA DE CONSUMO EXAL REALIZADO x EXAL PROJETO
9,5 °GL	1,52 kg vapor/L etanol	1,59 kg vapor/L etanol	2,64 kg vapor/L etanol	-1,05 kg vapor/L etanol	-1,12 kg vapor/L etanol	-0,07 kg vapor/L etanol

RESULTADO ALCANÇADO

CONSUMO INICIAL (UBV ATM)	2,64 kg vapor/L etanol
CONSUMO FINAL (EXAL REALIZADO)	1,59 kg vapor/L etanol
REDUÇÃO ABSOLUTA	1,05 kg vapor/L etanol
REDUÇÃO PERCENTUAL	39,8% de redução no consumo de vapor

EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE VAPOR



PRINCIPAIS BENEFÍCIOS OBTIDOS

- REDUÇÃO SIGNIFICATIVA DO CONSUMO ESPECÍFICO DE VAPOR
- MAIOR EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OPERACIONAL
- MENOR CUSTO OPERACIONAL E MAIOR COMPETITIVIDADE
- DESEMPENHO PRÓXIMO AO GARANTIDO EM PROJETO
- PROCESSO MAIS ESTÁVEL, SEGURO E SUSTENTÁVEL

A IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA FLEGSTIL® A VÁCUO PERMITIU REDUZIR O CONSUMO ESPECÍFICO DE VAPOR EM APROXIMADAMENTE 40%, ELEVANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E A COMPETITIVIDADE DA USINA BOA VISTA.

Destilação à Vácuo – Desafios na Implantação

PRINCIPAIS DESAFIOS DO PROJETO

SUPERADOS COM PLANEJAMENTO, SEGURANÇA E EXCELÊNCIA EXECUTIVA

SEGURANÇA

- Segurança dos colaboradores durante as atividades de montagem.
- Grande quantidade de içamentos críticos.
- Trabalho simultâneo de diversas equipes.
- Controle rigoroso de riscos durante a entressafra.
- Treinamento do time.

ENGENHARIA

- Compatibilização da nova tecnologia com a estrutura existente.
- Retrofit de equipamentos já instalados.
- Adequação de tubulações, instrumentação e utilidades.
- Validação independente dos cálculos de engenharia da Exal.

PRAZO

- Execução integral durante o período de entressafra.
- Atendimento ao cronograma sem impacto no início da safra seguinte.

DESAFIOS ENFRENTADOS.
RESULTADOS ENTREGUES.



RESULTADOS QUE GERAM VALOR!

TECNOLOGIA • EFICIÊNCIA • SUSTENTABILIDADE





TECNOLOGIA
Soluções inovadoras que otimizam processos e aumentam a performance.

EFICIÊNCIA
Resultados consistentes que fortalecem a operação e reduzem custos.

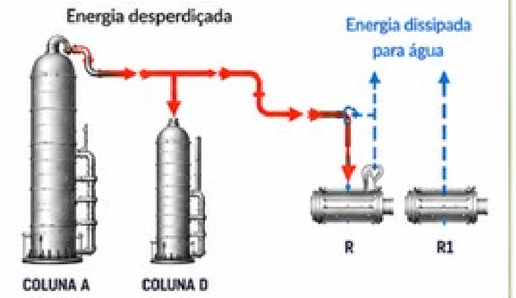
SUSTENTABILIDADE
Compromisso com o futuro através de práticas responsáveis e geração de valor contínuo.



Destilação à Vácuo – Resultados e Próximos Passos

COMO ENTÃO CONSEGUIMOS REDUZIR O CONSUMO DE VAPOR?

SISTEMA CONVENCIONAL



SISTEMA DVT – FLEGSTIL® A VÁCUO



BENEFÍCIOS OBTIDOS

- REUTILIZAÇÃO DA **ENERGIA DA FLEGMASSA**
- ELIMINAÇÃO DA DISSIPAÇÃO **DE ENERGIA NOS CONDENSADORES**
- REDUÇÃO DO **CONSUMO DE VAPOR**
- MENORES TEMPERATURAS **DE OPERAÇÃO**
- NÃO FORMAÇÃO DE COMPOSTOS **INDESEJADOS POR DEGRADAÇÃO TÉRMICA**
- REDUÇÃO EXPRESSIVA DA **INCRUSTAÇÃO NAS BANDEJAS**
- AUMENTO DA **EFICIÊNCIA OPERACIONAL**
- MAIOR CONFIABILIDADE **DA DESTILARIA**



REDUÇÃO DO CONSUMO DE VAPOR | MENORES TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO | REDUÇÃO EXPRESSIVA DA INCRUSTAÇÃO NAS BANDEJAS | NÃO FORMAÇÃO DE COMPOSTOS INDESEJADOS | MAIOR EFICIÊNCIA OPERACIONAL E CONFIABILIDADE

O SEGREDO DA REDUÇÃO DE VAPOR NÃO ESTÁ APENAS NO VÁCUO, MAS NA CAPACIDADE DE REAPROVEITAR ENERGIA QUE ANTES ERA DESCARTADA PELO PROCESSO.

PRÓXIMA ETAPA

IMPLANTAÇÃO DA TECNOLOGIA EXAL FLEGSTIL® A VÁCUO NA DESTILARIA



CAPACIDADE DE PRODUÇÃO:
1.200 m³/dia
DE ETANOL

UBV a partir de 2027 – Após Fase 2

- ❑ Cana + Cana Equiv. (Milho) -> **10.800.000tc$_{eq.}$**
- ❑ Produções:
  - Etanol -> 930.000m^3/ano
  - DDGs -> 300.000t/ano
  - Óleo -> 23.000t/ano
  - Levedura -> 11.000t/ano
  - EE export. -> 165.000MWh
- ❑ Cons. vapor no processo Cana* -> 300Kgv/tc
- ❑ Cons. vapor tt nos processos*, período safra -> 470Kgv/tc ou **275Kgv/tc$_{eq.}$**
- ❑ Sobra de bagaço -> aprox. 15.000tb
- ❑ Captação de água -> aprox. **0,50m^3/tc$_{eq.}$**

* Incluindo secagem de levedura (22tv/h) e concentração de vinhaça (45tv/h)

Aplicações tecnológicas

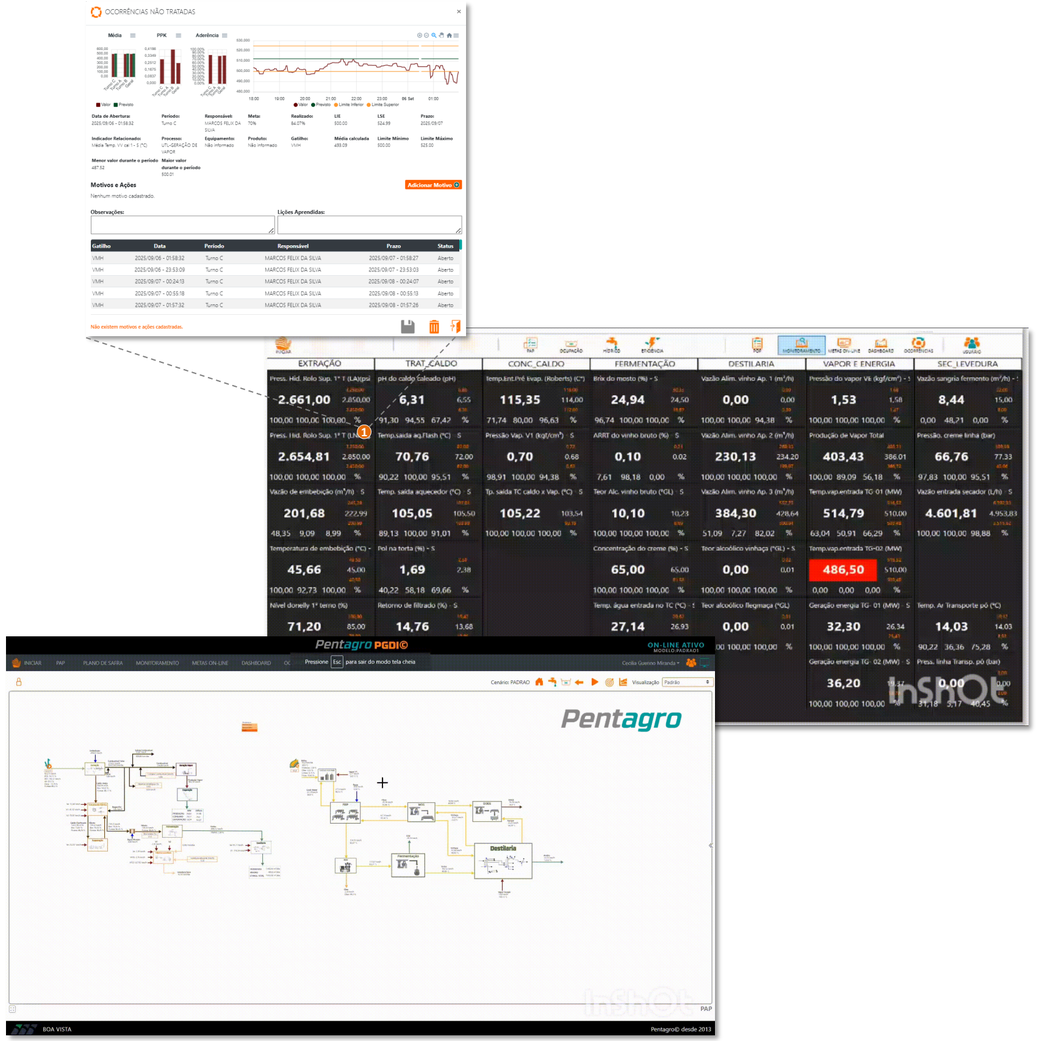
1º Gêmeo digital Etanol de Milho Integrado

Simulações diárias

- Adequações ao BM e BE
- Direcionamento de gestão do processo
- Revisão da eficiência do processo no dia anterior

Monitoramento online

- Análise de performance online
- Comparativo entre turnos de trabalho
- Gestão de ocorrências (fato, causa, ação)
- Gestão de RTAs (relatório tratamento de anomalia)



Jornada 4.0

Workshop 4.0

1. Para onde vamos?

- Operações eficientes, autônomas, padronizadas e seguras
- Utilização das capacidades nominais das indústrias operando com estabilidade e continuidade
- Centralização das informações de processos e produção – Ambiente Corporativo



GEO Automação

2. Onde estamos?

- Mapeamento dos ativos e sistemas de automação
- Mapeamento das arquiteturas de automação
- Mapeamento da documentação técnica
- Identificação de oportunidades

3. Como estamos?

- Identificação do *GAP* entre a maturidade atual e maturidade desejada

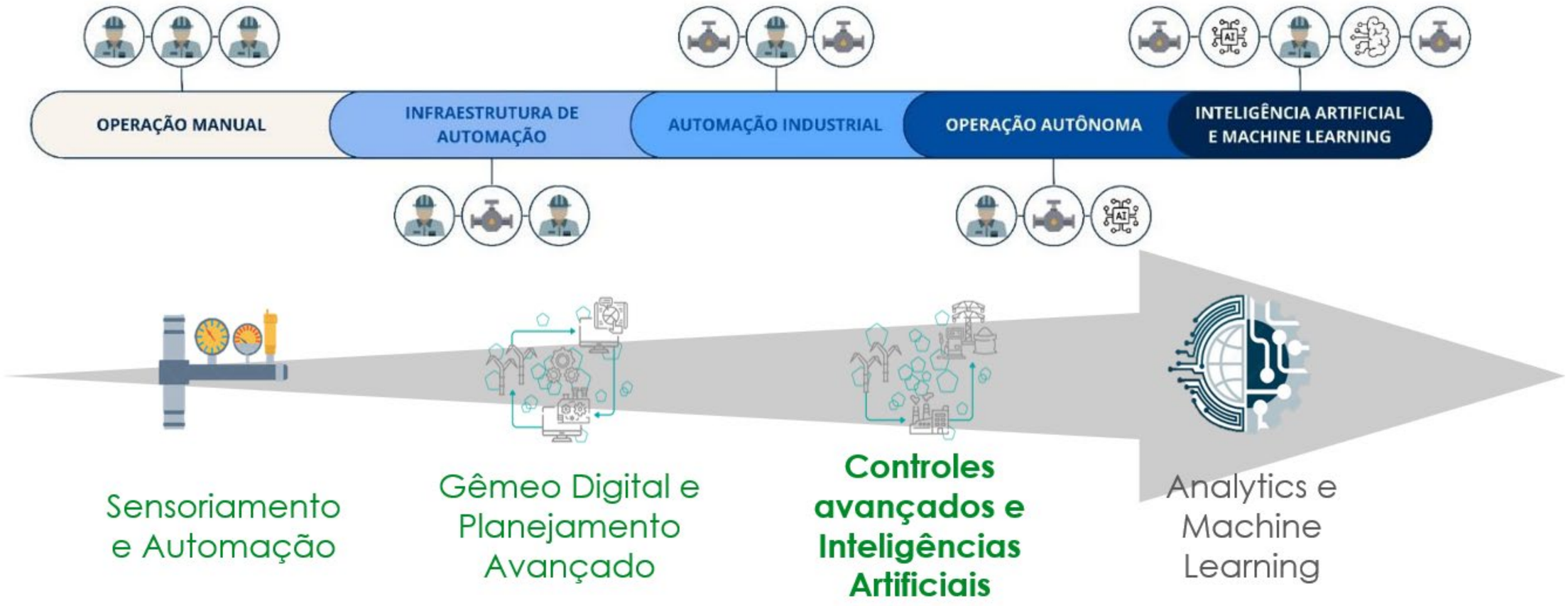
4. Como chegaremos?

- Priorização adequada dos investimentos
- Plano 'plurianual' para investimentos
- Projetos pilotos de tecnologia
- Desenvolvimento das equipes

Tecnologia e Engenharia Industrial

SENAI

Jornada 4.0


OPERAÇÃO MANUAL
INFRAESTRUTURA DE AUTOMAÇÃO
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL
OPERAÇÃO AUTÔNOMA
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MACHINE LEARNING
AI
AI
Sensoriamento e Automação
Gêmeo Digital e Planejamento Avançado
Controles avançados e Inteligências Artificiais
Analytics e Machine Learning

Pontos chave de atuação



O CONTROLE AVANÇADO

O que era necessário?

ATUAÇÃO RÁPIDA
MULTIVARIÁVEL
CONTRA-INTUITIVA

GESTÃO DAS MALHAS DE CONTROLE

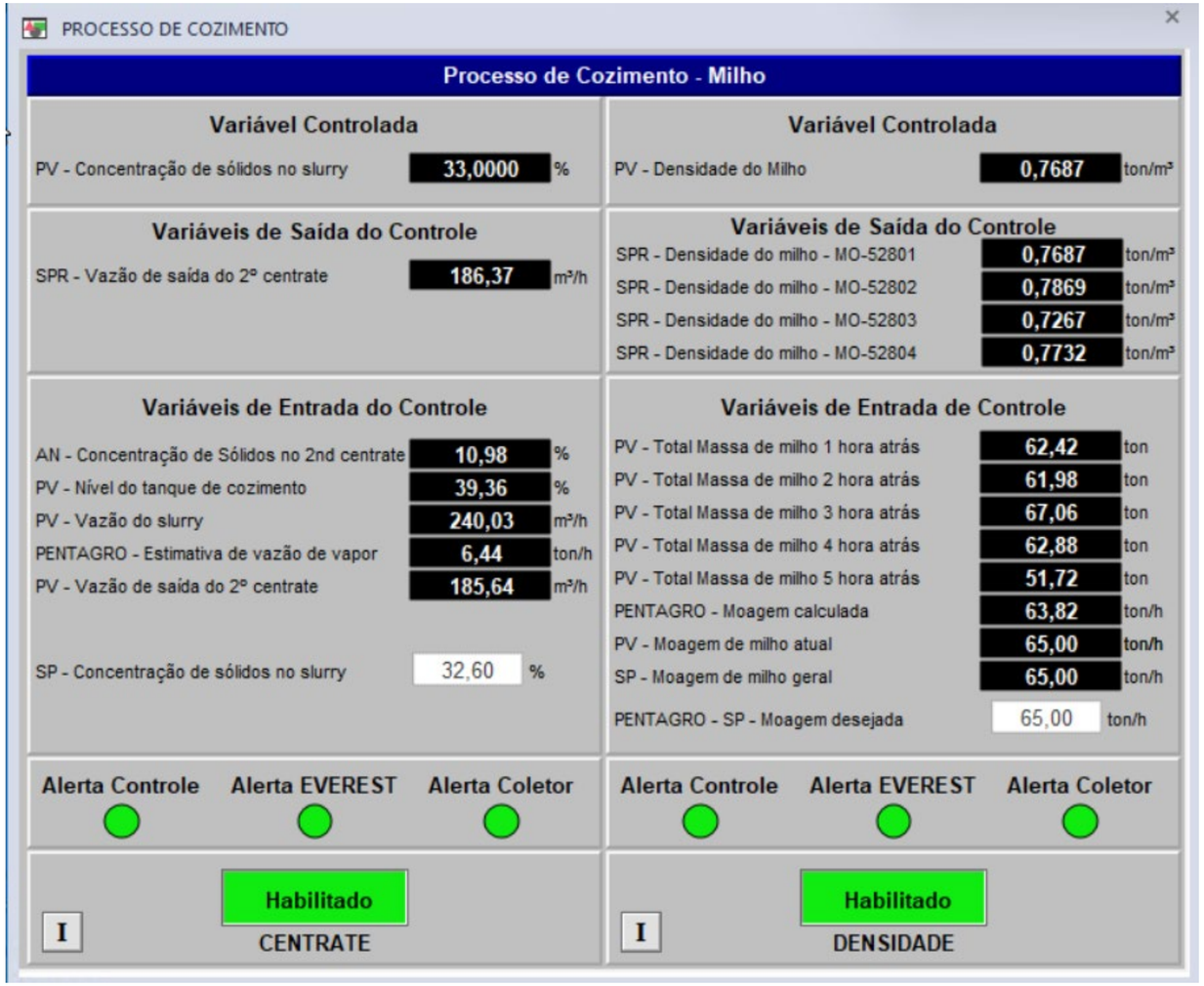
VARIÁVEIS DE CONTROLE ESTRATÉGICAS

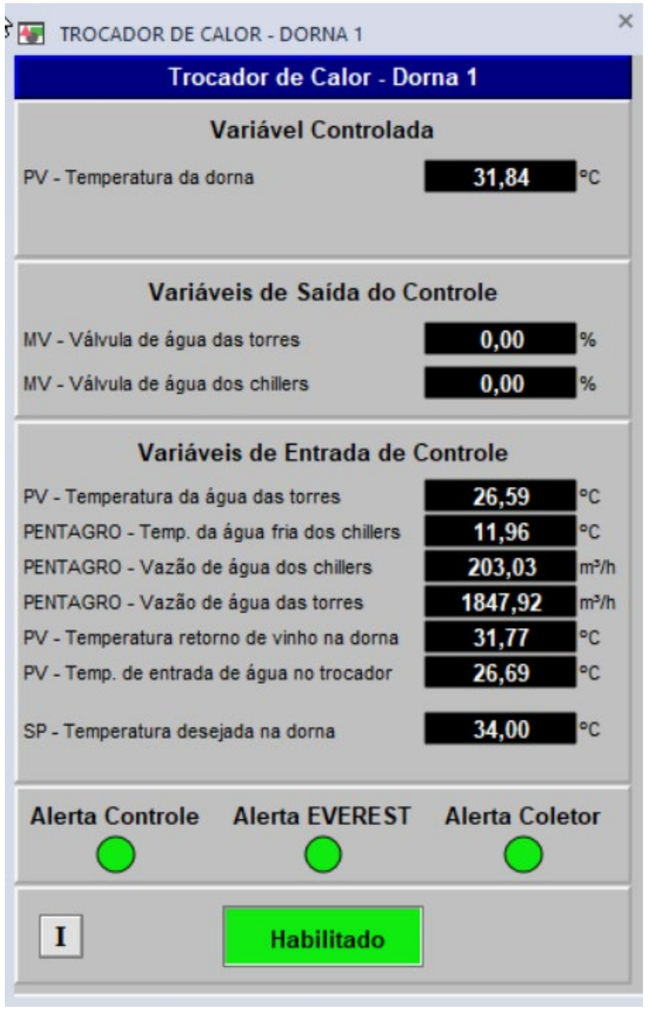
PRINCIPAIS DIFERENÇAS

Regulagem válvulas rotativas (densidade milho)

Controle de sólidos

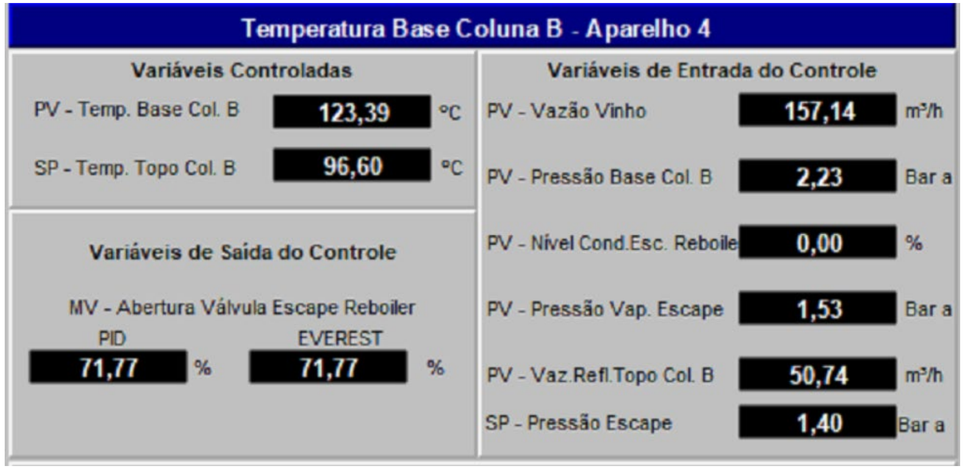
Resfriamento dornas (chiller + torre)

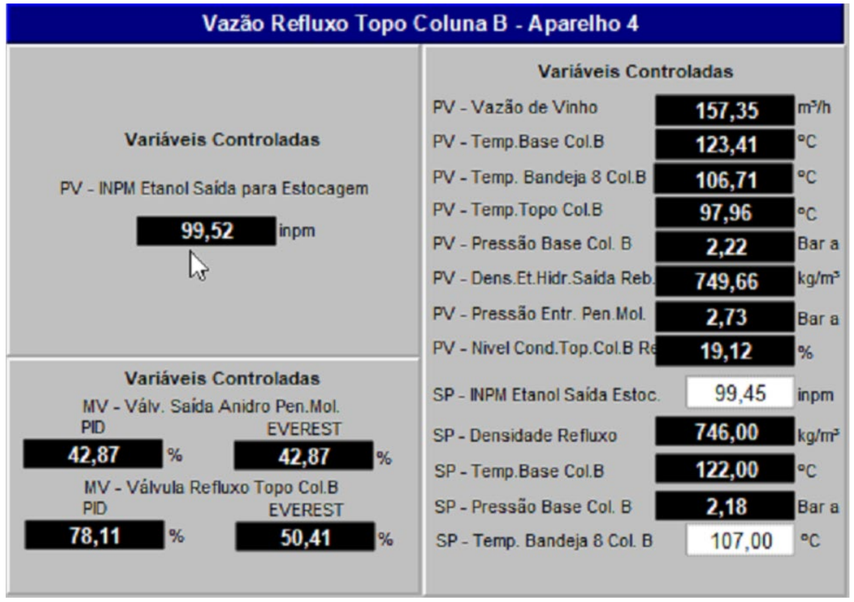


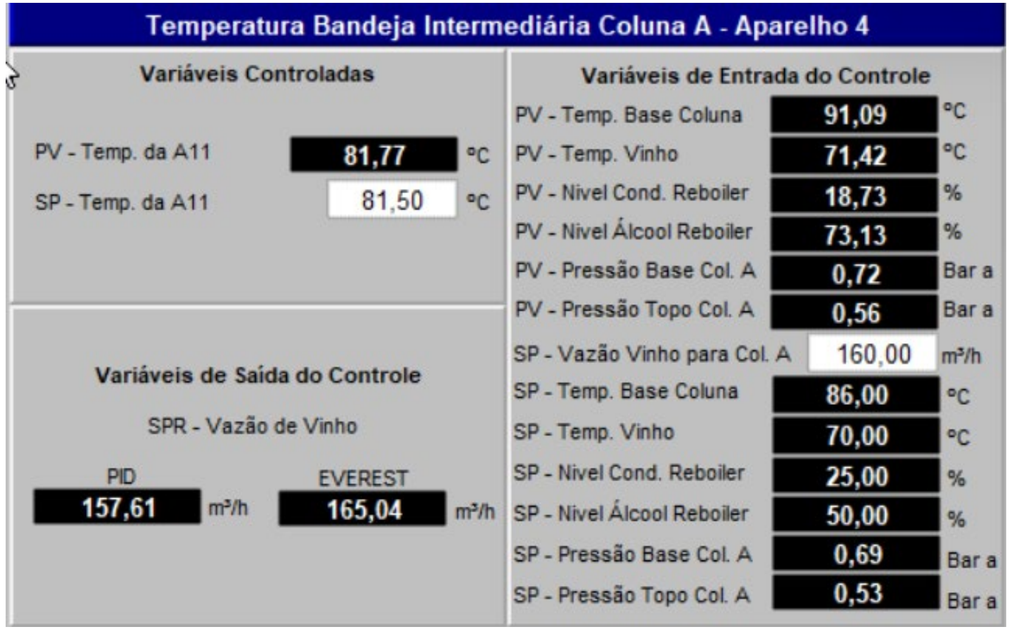


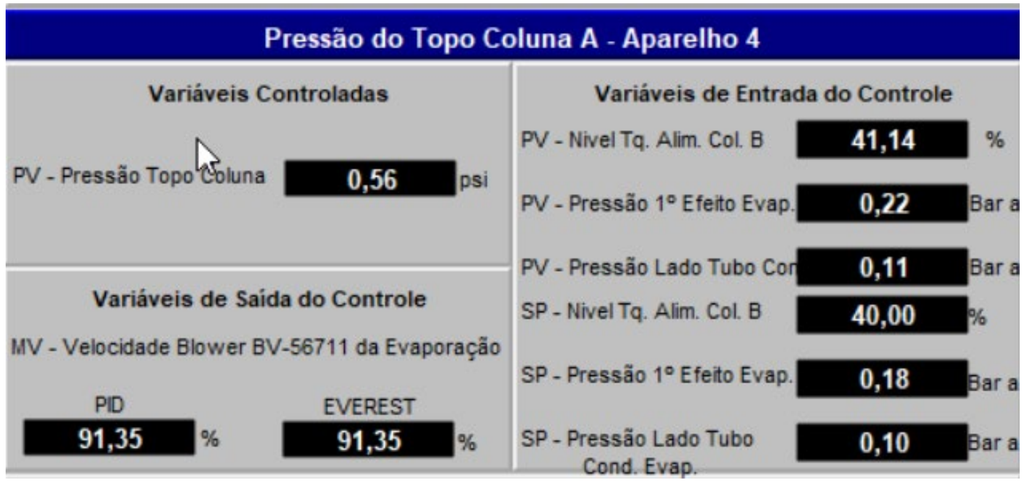
PRINCIPAIS DIFERENÇAS

Vazão de vinho | **Refluxo** | **Vazão vapor** | **Vazão Peneiras Moleculares**









CONTROLE AVANÇADO

Cozimento

Gráfico BoxPlot

Tag de análise

Real_RD_PV_DsSlurry_Cozedor

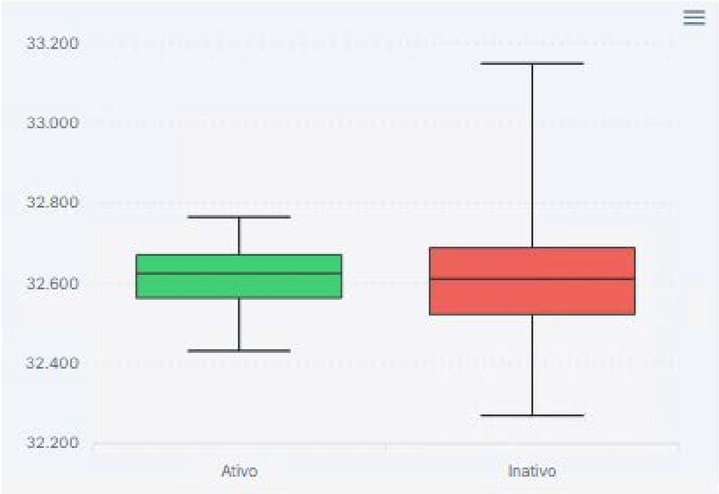
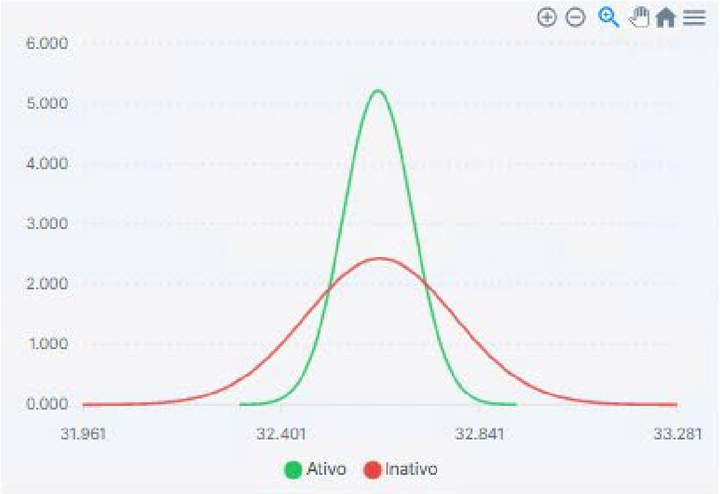


Gráfico de Gauss

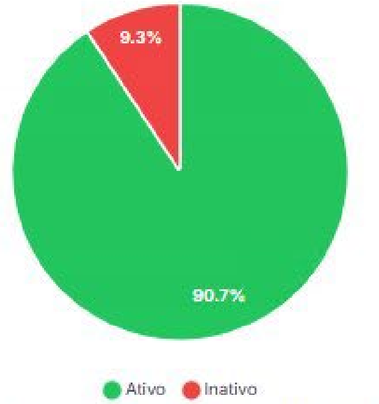
Tag de análise

Real_RD_PV_DsSlurry_Cozedor



Redução do Desvio Padrão: 53.475%

Gráfico de Pizza (Disponibilidade)

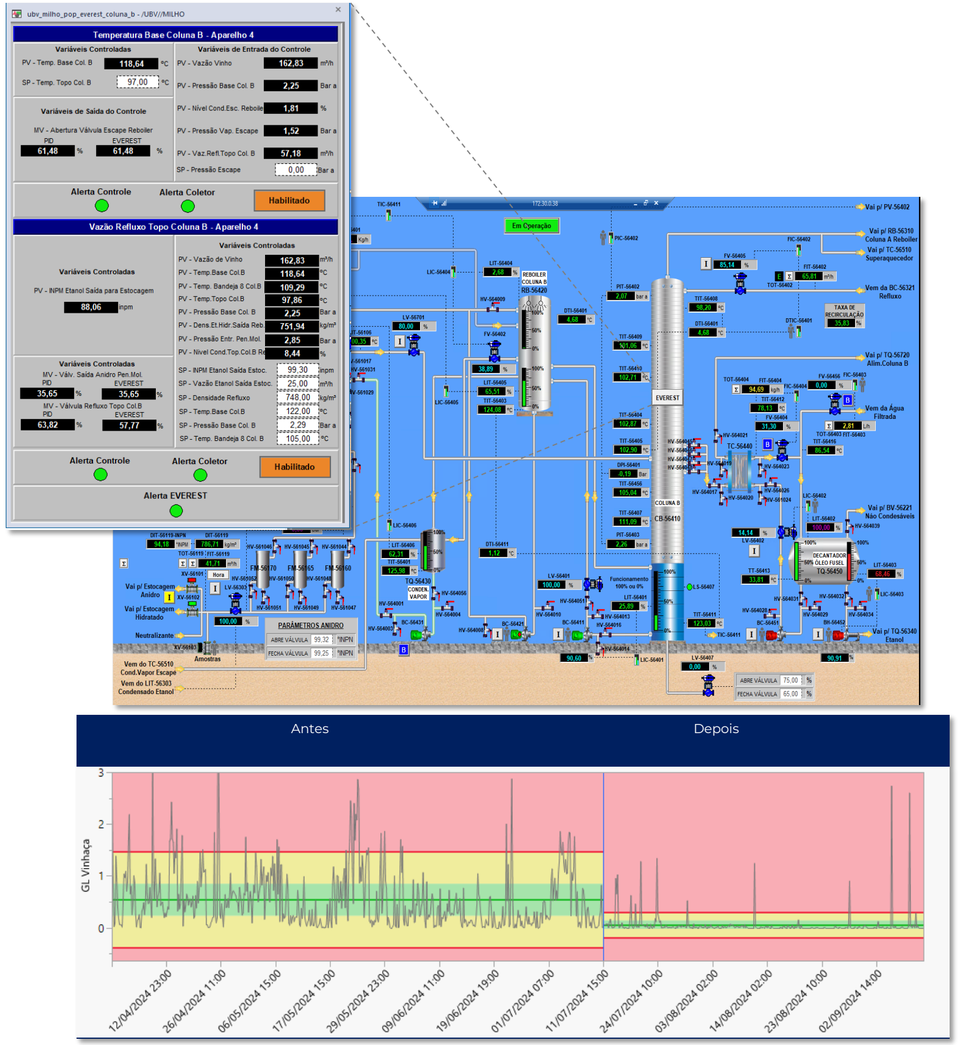


Periodo: 26/09/2026 06:30 → 26/09/2026 12:35

CONTROLE AVANÇADO

Destilação

- Redução da **intervenção operacional** em **±50%**
- Redução média nos **desvios** de **55%**
- Redução das **perdas** na destilação em **±45%**
- **4 variáveis controladas:**
  - **Pressão Topo Coluna A**
  - **Temperatura Bandeja Intermediária Coluna A**
  - **Temperatura Base Coluna B**
  - **Vazão de Refluxo**



Obrigado!

São Martinho