

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

RENAN VICTOR DONALONSO SIQUEIRA

Projeto de Controle em uma Destilação Alcoólica de Cana-de-Açúcar Utilizando  
Controlador PID

São Carlos

2017



AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S618p Siqueira, Renan Victor Donalsonso  
Projeto de controle em uma destilação alcoólica de  
cana-de-açúcar utilizando controlador PID / Renan  
Victor Donalsonso Siqueira; orientadora Máira Martins da  
Silva. São Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2017.

1. Destilarias. 2. Etanol. 3. Controladores PID. 4.  
Lógicas de controle. I. Título.

RENAN VICTOR DONALONSO SIQUEIRA

Projeto de controle em uma destilação alcoólica de cana-de-açúcar utilizando controlador PID

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Graduação em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Máira Martins da Silva

São Carlos

2017

## FOLHA DE AVALIAÇÃO

**Candidato:** Renan Victor Donalsonso Siqueira

**Título:** Projeto de Controle em uma Destilação Alcoólica de Cana-de-açúcar utilizando Controlador PID

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo  
Curso de Engenharia Mecatrônica.

### BANCA EXAMINADORA

Professora Doutora Maíra Martins da Silva  
(Orientadora)

Nota atribuída: 8,0 ( oito )

Maíra M. de Silva  
(assinatura)

Professor Doutor Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira

Nota atribuída: 8,0 ( oito )

[Assinatura]  
(assinatura)

Engenheiro Douglas Martins Rocha

Nota atribuída: 8,0 ( oito )

Douglas Martins Rocha  
(assinatura)

Média: 8,0 ( oito )

Resultado: APROVADO

**Data:** 11/07/2017

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM  NÃO  Visto do orientador Maíra M. de Silva

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
Roberto e Rosangela.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me dar a vida, saúde e minha família, além de abrir as portas e oportunidades para mim, me disponibilizando estar hoje realizando o sonho de me formar em engenharia mecatrônica pela USP.

Agradeço também aos meus pais: Antonio Roberto Medina Siqueira, por ser um exemplo para mim em todos os sentidos, do que é correto, de determinação, atitudes, de correr atrás de seus objetivos e, principalmente, de ser pai; Rosangela Navarro Donalsonso Siqueira, por sempre dar o apoio necessário em tudo, conselhos, a cobrança para sempre dar o meu melhor e terminar os planos iniciados, e, principalmente, o amor incondicional por seus filhos. É uma honra para mim poder finalizar o sonho de vocês, de ter seus filhos com o melhor estudo possível e formados, com oportunidades para a vida. O conhecimento, a educação, é a maior herança que podiam ter nos deixados.

Agradeço à minhas irmãs, Larissa Thais Donalsonso Siqueira e Thalissa Lais Donalsonso Siqueira, por estarem sempre ao meu lado, apoiando e torcendo, como faço por elas. Agradeço minha vó, Josepha Navarro, por ser minha segunda mãe com todo seu amor e apoio.

Agradeço à minha orientadora neste projeto, Prof. Dr. Maira Martins da Silva, tanto pelo suporte dado na realização deste trabalho, como durante minha graduação, Sematron e aos esforços para melhoria do curso de engenharia mecatrônica.

Também gostaria de lembrar a empresa Raízen e o senhor Heitor Ruiz, pela oportunidade de desempenhar meu trabalho de estágio, confiarem em meu potencial e me disponibilizar um grande aprendizado.

Por último, gostaria de agradecer aos meus amigos que compartilharam momentos importantes em minha graduação. A todos do “Balada dos Brothers”, “Sancho”, todos amigos de Bariri, ao Rafael e Estêvão pelas pessoas que são e por estarem sempre presentes, e em especial: “Tchelo”, “Pinto” e “Felps” pelo apoio, companheirismo, momentos e conselhos durante toda a graduação e fora dela, fazendo dessas ocasiões, especiais.

## RESUMO

SIQUEIRA, R. V. D. **Projeto de controle em uma destilação alcoólica de cana-de-açúcar utilizando controlador PID.** 2017. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Este trabalho consiste em fazer um estudo das etapas de produção de etanol através da cana-de-açúcar como matéria-prima. Os tipos de etanol produzidos em usinas sucroalcooleiras e suas formas de produção estão descritos. Para que exista uma maior eficiência e segurança nas indústrias desse setor, existe a necessidade da automação dos processos, tendo maior precisão nos produtos desejados e velocidade de resposta aos distúrbios externos. A partir disso, será feito um aprofundamento dos processos de automação dos aparelhos de destilação de álcool, analisando as variáveis de processo que devem ser monitoradas, tendo dessa forma definido as malhas de controle necessárias para o monitoramento do processo de produção. Considerando o aprendizado de controladores do tipo PID durante a graduação, será realizada a programação de uma lógica em blocos funcionais capaz de realizar o controle das etapas do processo de destilação alcoólica, definindo as variáveis estudadas e o estudo do funcionamento dos controladores desse tipo.

Palavras-chave: Destilarias. Etanol. Controladores PID. Lógicas de controle.

## ABSTRACT

SIQUEIRA, R. V. D. **Control design in an alcoholic distillation of sugarcane using PID controller**. 2017. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

This work consists of making a study of the stages of ethanol production using sugarcane as raw material. The types of ethanol produced in sugarcane plants and their original parts are Comments. In order to achieve greater efficiency and safety in the industries of this sector, there is a need for automation of processes, having greater precision in the desired products and speed of response to external disturbances. From this, a deepening of the automation processes of the alcohol distillation apparatus will be done, analyzing the process variables that must be monitored, thus defining the control meshes necessary for the monitoring of the production process. Considering the learning of PID controllers during graduation, a functional block logic will be programmed to control the stages of the alcohol distillation process, defining the studied variables and the study of the operation of controllers of this type.

Keywords: Distilleries. Ethanol. PID controllers. Logic of control.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de destilação do álcool.....	14
Figura 2 – Fluxograma simplificado de processos.....	15
Figura 3 – Recepção e Preparo.....	16
Figura 4 – Rolos de extração.....	16
Figura 5 – Etapa de Clarificação do Caldo.....	18
Figura 6 – Etapa de Decantação.....	18
Figura 7 - Etapa de Fermentação.....	19
Figura 8 – Processo de Destilação.....	20
Figura 9 – Retificação do vinho.....	21
Figura 10 - Destilação alcoólica.....	22
Figura 11 - Desidratação alcoólica.....	23
Figura 12 – Diagrama simplificado do controle em malha fechada.....	24
Figura 13 – Diagrama de blocos controlador PID.....	26
Figura 14 – Curva de resposta ideal de um controlador PID.....	27
Figura 15 – Controlador CD600.....	29
Figura 16 – Bloco de Função típico.....	29
Figura 17 – Esquematização da malha de controle de pressão.....	31
Figura 18 - Esquematização da malha de controle de temperatura.....	32
Figura 19 – Lógica de programação do controle de vapor da Coluna A.....	33
Figura 20 – Lógica de programação do controle de temperatura da bandeja B4.....	35
Figura 21 – Ambiente do Loop G.....	36
Figura 22 – Entrada Analógica (AI).....	39
Figura 23 – Alarme Duplo (ALM).....	40
Figura 24 – PID Avançado (APID).....	40
Figura 25 – Seleção SP Local/Remoto.....	41
Figura 26 – Estação Automático/Manual.....	41
Figura 27 – Seletor de Entrada.....	42
Figura 28 – Saída de Corrente.....	42
Figura 29 – Front View.....	43
Figura 30 – Entrada Digital.....	43
Figura 31 – Linearização.....	44
Figura 32 – Derivativa/Lead-Lag.....	44
Figura 33 – Curve de Linearização.....	45
Figura 34 – Constantes.....	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

- °GL: Grau Gay-Lussac de teor alcoólico
- °C: Grau Celsius de temperatura
- kg.f/cm<sup>2</sup>: Pressão por unidade de área
- pH: Potencial hidrogeniônico
- Brix: Concentração de partículas sólidas

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Indústrias de Álcool e sua Automação .....	13
1.2	Objetivo.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1	Processos da Destilação .....	15
2.2	Controladores .....	23
2.2.1	Controle em Malha Fechada .....	23
2.2.2	Controlador PID.....	24
3	METODOLOGIA .....	28
3.1	Malhas de Controle .....	28
3.2	Controle de Pressão.....	30
3.3	Controle de Temperatura.....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33
4.1	Pressão de Vapor da Coluna A, B e C.....	33
4.2	Temperatura da bandeja B4 da Coluna B.....	34
4.3	Loop Geral .....	35
5	CONCLUSÃO .....	36
	REFERÊNCIAS .....	38
	ANEXO A.....	39

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Indústrias de Álcool e sua Automação

A alta rentabilidade brasileira no setor sucroalcooleiro é historicamente conhecida por suas condições climáticas favoráveis à produção de cana-de-açúcar, trazendo oportunidades lucrativas e rentáveis para as empresas do setor. Esse comódite é utilizado para obtenção de diversos produtos após longos processos de produção, tendo principais resultados: açúcar, etanol, bioenergia. O presente estudo abordará o quadro de produção do etanol na etapa de destilamento.

A geração do etanol busca atender a demanda do álcool industrial, usado em empresas inseridas no seguimento de bebidas, cosméticos, farmacêuticas, tintas e solventes, como também a necessidade do álcool carburante, utilizado como fonte energética e combustível. Este biocombustível recebe grande incentivo do mercado por possuir características menos agressivas ao meio ambiente, com um custo e preço favorável relativo ao dos combustíveis fósseis.

Existem dois tipos de álcool etílico produzido nas usinas sucroalcooleiras:

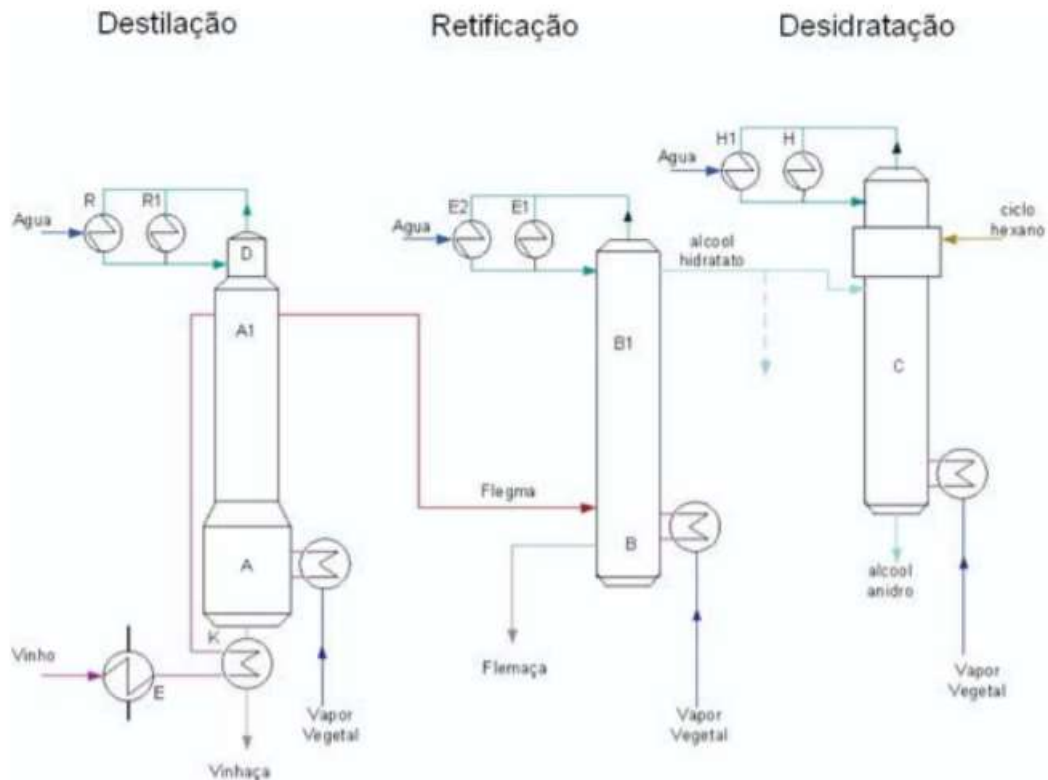
- Hidratado: possui grau alcoólico em torno de 96° GL (96% pureza, 4% água). Utilizado exclusivamente como combustível;
- Anidro: possui grau alcoólico por volta de 99,5° GL (99,5% de pureza, 0,5% água). É considerado isento de água.

A principal origem do etanol brasileiro é a cana-de-açúcar. E as técnicas utilizados para obtenção dessas variações do etanol são a fermentação de um caldo de cana, vindo de uma sequência de processos, e a destilação fracionada do caldo fermentado.

Para que a produção do etanol seja eficiente, o projeto da destilaria é constituído por um aparelho, tendo 3 colunas (A, B e C). Elas estão interligadas em sequência  $A \rightarrow B \rightarrow C$  por tubulações e nelas acontecerá a destilação fracionada do etanol. É de grande importância garantir o perfeito controle das etapas para atingir os pontos corretos dos graus alcoólicos de saída de cada coluna.

Assim, é necessário a presença de um projeto de automação para realizar um controle refinado dos processos. A Figura 1 mostra como é o esquema de destilação do etanol.

Figura 1 – Processo de destilação do álcool



Fonte – ALBUQUERQUE, pg. 3 (2007)

Para realizar este gerenciamento do processo, é necessário envolver o ligamento de equipamentos de instrumentação, chamados de *escravos*, com os de controle, chamados de *mestre*, que devem comandar com exatidão o funcionamento das válvulas de passagem para manter as variáveis de processo adequadas. Esse exato funcionamento do projeto de automação das colunas do aparelho de destilação depende do controle de 2 variáveis de processo: a pressão na base das colunas e a temperatura no topo das colunas.

Torna-se um desafio realizar um controle refinado do aparelho de destilação a partir destes conceitos. Será realizado por este trabalho, através de um controlador do tipo PID.

## 1.2 Objetivo

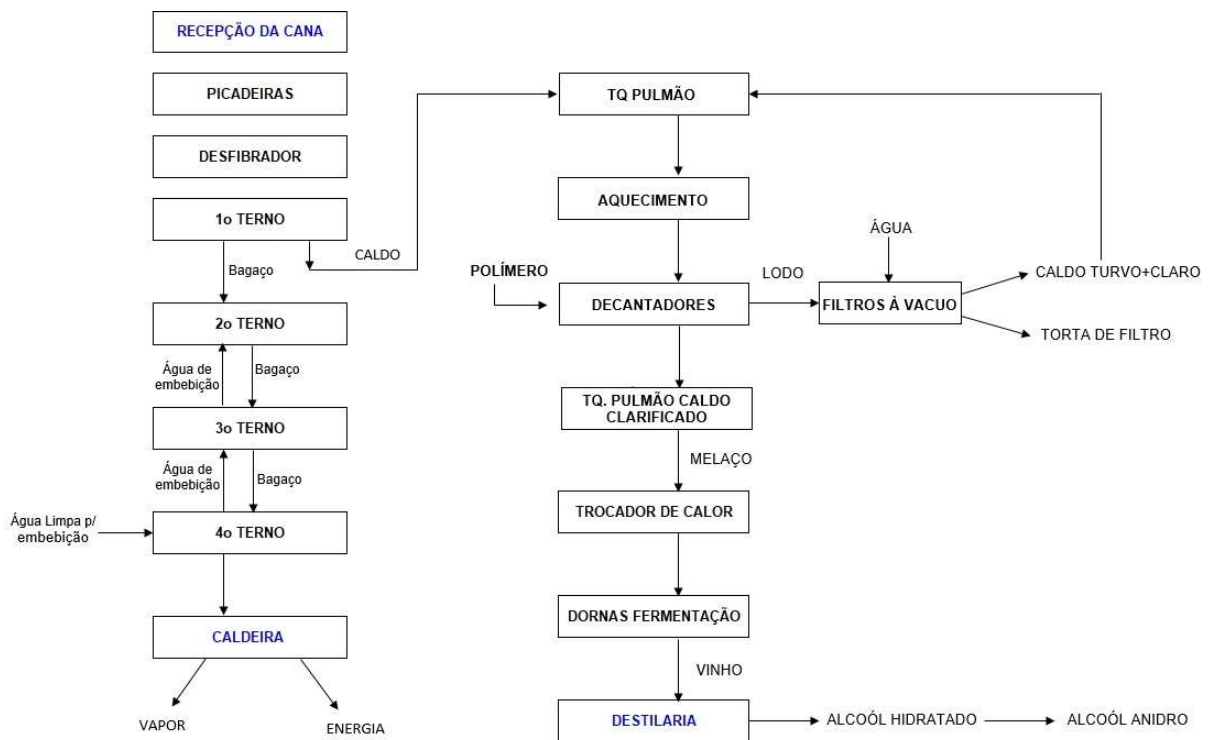
Realizar uma programação de controle PID do aparelho de destilação baseada na linguagem de blocos livres, abordando os conceitos de funcionamento do processo e aplicação dos conhecimentos de controle adquiridos durante graduação.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Processos da Destilação

Para obtenção do álcool etílico a partir da cana-de-açúcar, são executados vários processos em sequência para realizar seu tratamento. A Figura 2 traz em fluxograma simplificado a sequência de processos em uma usina sucroalcooleira.

Figura 2 – Fluxograma simplificado de processos

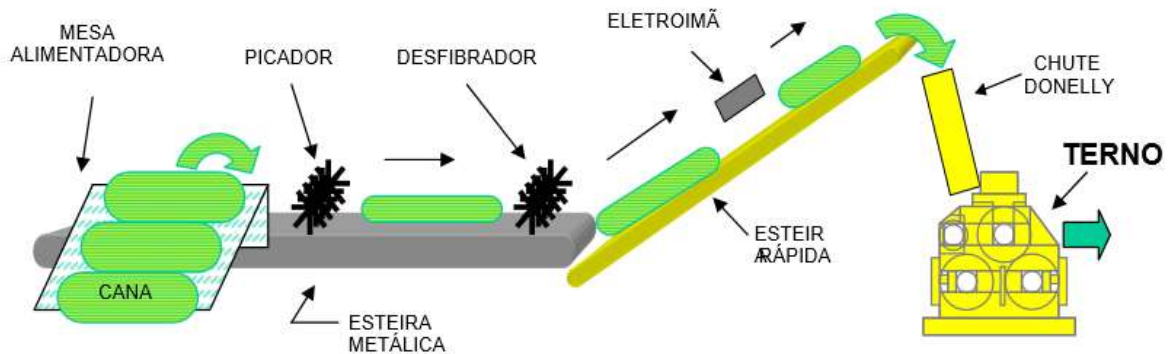


Fonte – Autor

Primeiramente a cana-de-açúcar é recebida na indústria com uma limpeza, que retirará impurezas e objetos indesejados no produto, e levado por esteiras até os picadores e desfibradores que devem nivelar as cargas e quebrarem as fibras dessa carga, transformando-as em uma massa fina e com menos resistência, facilitando a extração do caldo da cana-de-açúcar. Esta etapa é chamada de *Recepção e Preparo* e segundo Ribeiro (2003, pg. 36) tem a função

de preparar a cana-de-açúcar mediante o quebramento da estrutura dura e ruptura das células para a moagem. A Figura 3 ilustra a etapa de recepção da cana-de-açúcar.

Figura 3 – Recepção e Preparo

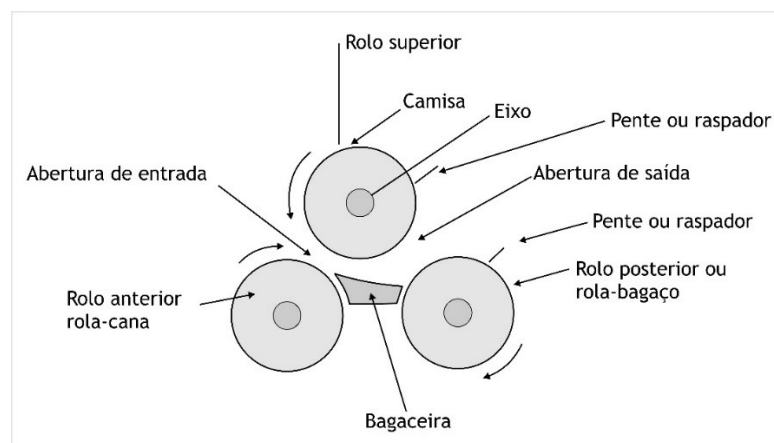


Fonte – A Usina de Açúcar e sua Automação (RIBEIRO, 2003, pg. 36)

A cana desfibrada é enviada por esteiras até as Moendas para a etapa de *Moagem e Extração*, onde passará por 3 a 7 unidades de esmagamento, chamadas de ternos ou Shut Donelly, e terão a finalidade de separar a cana-de-açúcar do seu caldo. Estes ternos são compostos por 4 rolos ranhurados dispostos em um triângulo isósceles de forma a criar uma trajetória onde exercerão forte pressão sobre a cana duas vezes.

Ao momento que a cana é prensada a uma pressão de cerca de  $250 \text{ kg.f/cm}^2$  (FATEC, 2006, pg. 10), é extraído e recolhido seu caldo e o bagaço da cana segue para as Caldeiras por meio de esteiras de borracha e será queimado para gerar tanto vapor, para alimentar os processos industriais, como energia. O sistema de esmagamento da cana é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Rolos de extração



Fonte – Equipe de Artes SEaD/UFSCar (2011)

Para aumentar a eficiência da retirada de sacarose, é utilizada a técnica de embebição. No Brasil, a mais utilizada é a embebição do tipo composta (Sallas, 2005, pg. 4), que consiste na adição de água entre os dois últimos ternos e o caldo extraído do último retorna para o imediatamente anterior e assim sucessivamente até o segundo terno.

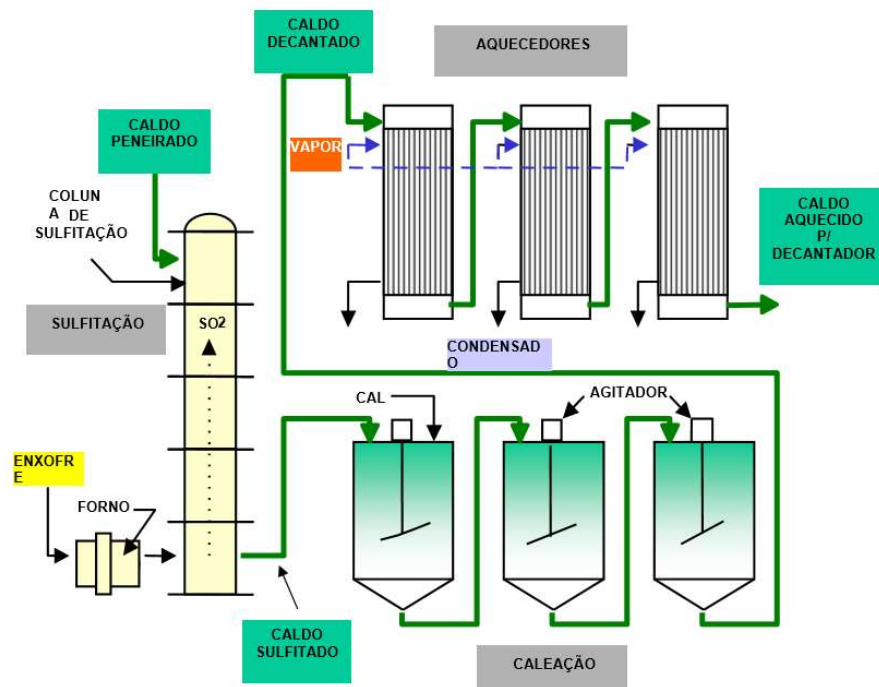
O caldo retirado é captado e bombeado para a área de fábrica, seguindo para a etapa de *Tratamento de Caldo*. Nessa etapa o caldo receberá vários processos físicos e químicos para que ele atinja as características adequadas para a obtenção de um produto final de qualidade. Tornando-se numa das etapas mais importantes na fabricação do álcool.

Dentro desta fase ocorre o processo de *Clarificação do Caldo*, que tem por objetivo precipitar todas as impurezas do caldo, eliminando as substâncias prejudiciais aos produtos finais. Para isso, o caldo é inicialmente aquecido para elevar sua concentração de açúcar e a partir daí é adicionado vários elementos químicos como bactericidas para eliminar desinfetar o caldo, ácido fosfórico para aumentar a taxa de sedimentação, leite de cal para provocar a floculação e favorecer a decantação das impurezas, além da correção do pH do caldo na ordem de 5,8 a 6,2 (CENAIC, 2010, pg. 76) que irá proteger equipamentos contra corrosão e manter o nível de nutrientes do caldo, e a adição de polímeros para flocular sólidos em suspensão.

O caldo tratado é novamente aquecido com temperatura entre 100 a 105°C (CENAIC, 2010, pg. 77) a fim de acelerar processos químicos e remover albuminas e impurezas coloidais e facilitar as ações nas próximas etapas. Esta etapa é esquematizada na Figura 5.

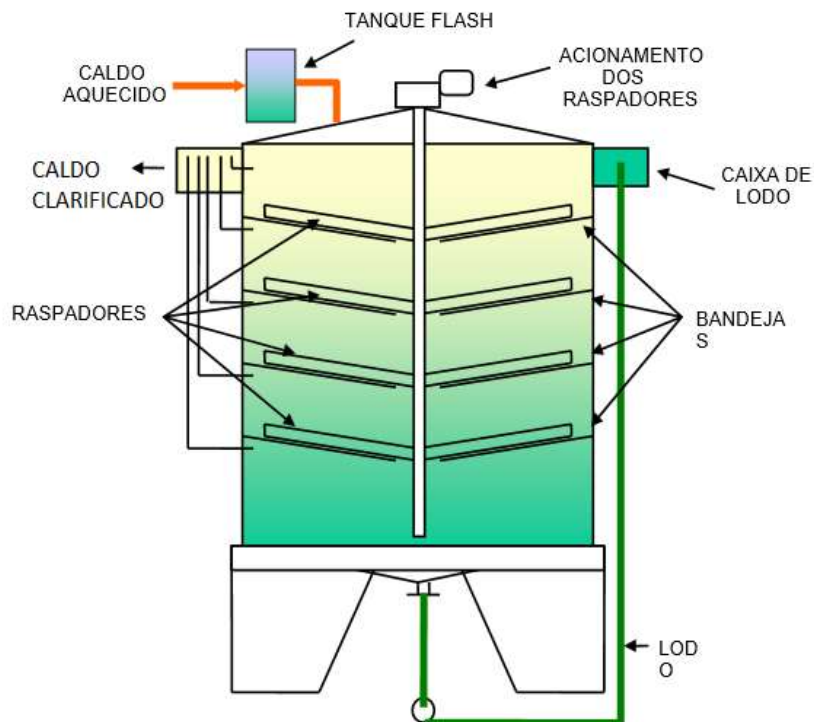
Chegando assim para a etapa de *Decantação*, ilustrado na Figura 6, onde o caldo tratado entra continuamente em um decantador para realizar a finalização de limpeza do caldo, sedimentando as impurezas, removendo gases e o *lodo*, restante do material contaminado que pode ser reprocessado e aproveitado. Obtendo dessa forma o *caldo clarificado* ou *melaço*, livre de materiais insolúveis e adequado para os próximos processos.

Figura 5 – Etapa de *Clarificação do Caldo*



Fonte – A Usina de Açúcar e sua Automação (RIBEIRO, 2003, pg. 55)

Figura 6 – Etapa de *Decantação*



Fonte – A Usina de Açúcar e sua Automação (RIBEIRO, 2003, pg. 56)

O *melaço* passa então por uma *Pré-evaporação*, aquecido a 115°C para aumentar a concentração de açúcar do caldo, chamado de *Brix*, para aproximadamente 19 a 22°. Isso facilitará o processo de fermentação do caldo por fazer uma esterilização das bactérias e leveduras selvagens que concorreriam com a levedura adicionada neste processo. (FATEC, 2006, pg. 41). O *melaço* passa então a se chamar de *mosto*, que não é nada mais do que o caldo com um Brix ajustado para a fermentação.

O processo de *Fermentação* consiste na preparação desse mosto, resfriando a 30°C (FATEC, 2006, pg. 42) em trocadores de calor e segue para as dornas. Nas dornas ocorrerá a fermentação alcoólica através da adição de leveduras. Segundo Sallas (2006, pg. 9), o processo de fermentação mais comum utilizado no Brasil é o *Melle-Boinot*, cuja característica principal é a recuperação das leveduras utilizadas a partir do mostro fermentado.

A essência da fermentação é a transformação dos açúcares contidos no mosto em moléculas de álcool etílico, energia e gás carbônico através da produção por microorganismos de enzimas catalisadoras. O processo de Fermentação é ilustrado na Figura 7.

Essa reação pode ser demonstrada pela reação simplificada de Gay Lussac:

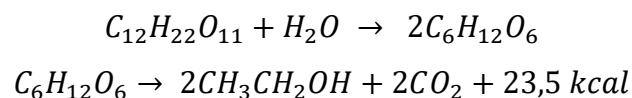
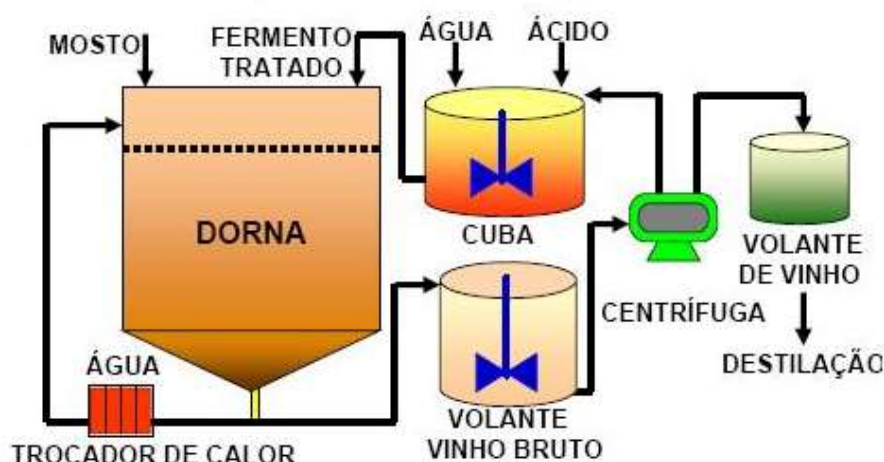


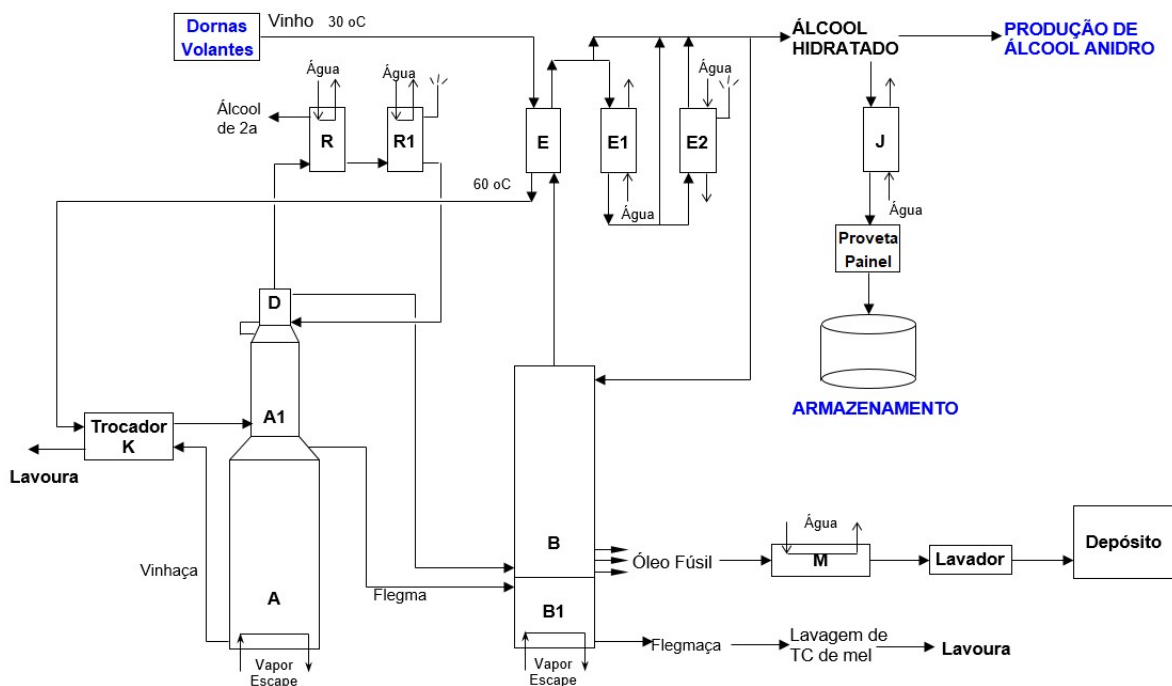
Figura 7 - Etapa de *Fermentação*



Após realizada a etapa de fermentação, o resíduo passa por ciclo de centrifugação para retirada das leveduras e temos um *vinho* resultando. Esta substância tem um teor alcoólico de 7 a 10° GL e seguirá para a etapa de *Destilação*, foco deste trabalho e ilustrado na Figura 8.

O vinho resultante possui uma composição complexa de substâncias, como álcool etílico, água, aldeídos, álcoois superiores, ácido acético, mosto, restante de leveduras e bactérias, entre outras. Dessa forma, é necessário apurar esse vinho, segregando o álcool etílico dos demais elementos através de várias destilações especiais.

Figura 8 – Processo de *Destilação*



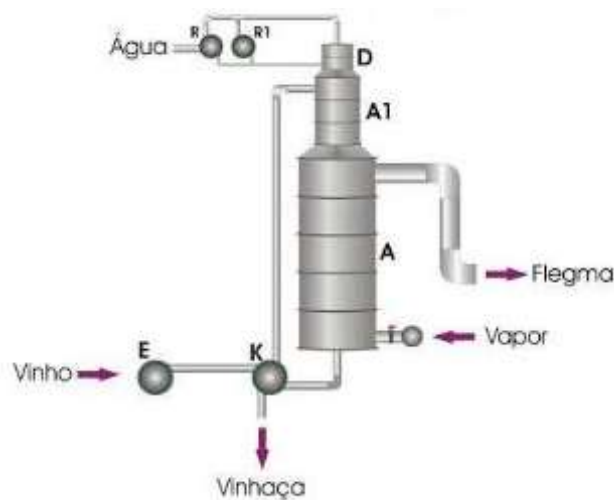
Fonte – Autor

Primeiramente o vinho é encaminhado das Dornas Volantes para o condensador E, onde será aquecido pelos vapores da coluna retificadora B, alcançado temperatura de 70 a 75°. Em seguida passa trocador K, para novamente ser aquecido pela *vinhaça* retirada da coluna A, atingindo temperatura de 90 a 94°C. É de grande importância o reaproveitamento do calor de todas as etapas, para atingir pontos adequados para os processos, aumento da eficiência e diminuição dos gastos.

O apuramento do vinho é realizado na coluna de apuramento A1, fase que visa a purificação do mesmo com a eliminação de resíduos indesejáveis, como aldeídos e ésteres. O vinho passa para a Coluna A e perdendo seu teor alcoólico até se transformar na *vinhaça*, que são os resíduos aquosos não aproveitados do vinho e impurezas.

A queda do °GL do vinho ao descer pela Coluna A acontece devido seu encontro com o vapor injetado na base da coluna que vai subindo, ocasionando o encontro. O vapor quente é capaz de levar consigo o álcool retido no vinho, originando o *flegma*, produto principal da destilação constituído por uma mistura hidro alcoólica impura com teor 50°GL. A Figura 9 traz o processo de *Retificação*.

Figura 9 – *Retificação* do vinho



Fonte – Desidratação do hidratado Peneira Molecular (ETEC, 2012, pg. 2)

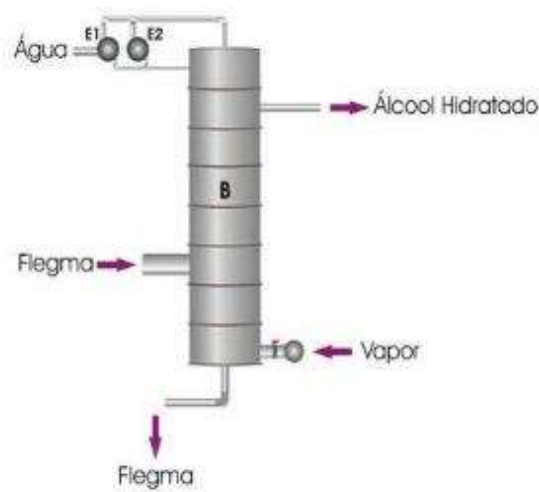
A vinhaça restante será resfriada e enviada para a lavoura em forma de adubo. Para isso, o processo de apuração deve ser realizado de forma exata, pois uma vinhaça com alto teor alcoólico significa perda na produção de etanol e uma substância imprópria para utilização no solo e plantações.

O flegma segue subindo a coluna A até atingir a bandeja A16, onde seguirá para a *Retificação* em direção a base da Coluna Retificadora B e subirá por ela até atingir seu topo com 96 a 97°GL como primeiro produto final: *álcool hidratado*. Já o flegma que segue para a coluna de esgotamento B1 perderá seu teor alcoólico pelo vapor e resultará em uma composição de água e resíduos alcoólicos chamada de flegmaça, e no óleo fúsel – mistura concentrada das

impurezas do flegma – onde ambos podem ser reaproveitados para outros fins. A *Destilação* alcoólica é ilustrada na Figura 10.

Pela formação de uma mistura homogênea entre água e álcool, identificado como etanol hidratado, torna-se limitada a obtenção de um álcool mais concentrado nos aparelhos convencionais. Para que isso seja possível, é realizado o processo de *Desidratação*.

Figura 10 - *Destilação* alcoólica



Fonte – Desidratação do hidratado Peneira Molecular (ETEC, 2012, pg. 3)

Nesta etapa ocorre a desidratação do álcool, ou seja, a condução do etanol hidratado para retirada da água utilizando a adição de benzol ou ciclo-hexano. O etanol hidratado + benzol entra ao topo da Coluna C fica em contato com o vapor, que entra ao pé da coluna e sobe, capaz de levar consigo as moléculas de água e criando uma solução ternária composta de (água + álcool + benzol) que será reaproveitado.

Tendo assim o produto final do etanol desidratado ao pé da Coluna C. Este produto leva o nome de *álcool anidro* com teores alcoólicos acima de 99,5°C (FATEC, 2004, pg. 47). A etapa de *Desidratação* vem identificada na Figura 11.

Figura 11 - Desidratação alcoólica



Fonte - Desidratação do hidratado Peneira Molecular (ETEC, 2012, pg. 4)

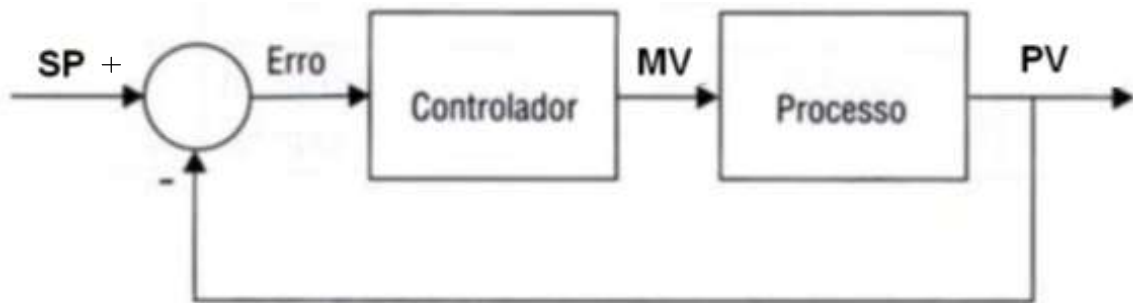
## 2.2 Controladores

### 2.2.1 Controle em Malha Fechada

No controle em malha fechada, informações sobre a saída de controle estão evoluindo e são utilizadas para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo em um instante específico. Isto é feito a partir de uma realimentação da saída para a entrada – chamado *feedback*. Em geral, a fim de tornar o sistema mais preciso e de fazer com que ele reaja a perturbações externas, o sinal de saída é comparado com o sinal de referência – chamado de *setpoint* – e o desvio ou erro entre os dois sinais é utilizado para determinar o sinal de controle que deve efetivamente ser aplicado ao processo. Assim, o sinal de controle é determinado de forma a corrigir este desvio entre os sinais.

O dispositivo que utiliza o sinal de erro para determinar ou calcular o sinal de controle a ser aplicado à planta é chamado de controlador, que realizará a comparação entre as variáveis e a Figura 12 mostra uma esquematização do funcionamento de um controlador.

Figura 12 – Diagrama simplificado do controle em malha fechada



Fonte – Autor

Em resumo, o controle em malha fechada utilizado nos processos automatizados se utiliza de um valor especificado e desejado por seu manipulador, comparado com o valor real obtido por sensores e transmissores de dados. A partir do desvio deste valores, é feita a correção por parte do controlador no equipamento monitorado.

Este tipo de controle nos permite aumentar a precisão do sistema, evitar perturbações externas, estabilizar controle de sistemas e diminuir a sensibilidade a variações dos parâmetros do processo.

Aplicando estas informações nos processos conhecidos, temos as definições:

- SP ou *Set Point*: valor desejado pelo manipulador para a variável do processo. Exemplo: valor do nível de um tanque.
- PV ou *Process Variable*: valor real medido da variável do processo a qual será utilizada para feedback e comparação no controlador. Exemplo: real nível de um tanque.
- MV ou *Manipulated Variable*: valor de correção da variável manipulada para que o valor de PV atinja SP. Exemplo: porcentagem de abertura de uma válvula para controle do nível de um tanque.

### 2.2.2 Controlador PID

O algoritmo de controle PID é o mais utilizado no controle industrial de seus processos. Carmo & Gomes (2005) relatam “os controladores industriais se apresentam em diferentes

formas. A mais comum, dentre elas, é o controlador do tipo PID, *Proporcional-Integral-Derivativo*. Este é suficiente em muitas situações onde se exige a presença de um controlador, particularmente quando processos dinâmicos são favoráveis e exigem desempenho modesto”.

Esta estrutura possui sinal de controle que é constituído de uma ação proporcional ao erro entre a referência e a saída do processo, juntamente com as ações integral e derivativa a esse erro.

A característica da ação proporcional é de acelerar a resposta da variável do processo, proporcional ao erro e após uma sequência de variações da própria variável ou mudança de *set point*.

A relação de um controlador apenas com ação proporcional entre a saída do controlador  $m(t)$  e o sinal do erro atuante  $e(t)$  é

$$m(t) = K_p \cdot e(t) \quad (1)$$

Onde o  $K_p$  é a sensibilidade proporcional ou ganho.

A ação integral produz respostas lentas, com longas oscilações e ajusta a variável de controle baseando-se proporcionalmente ao tempo em que o tempo acontece.

Em um controlador com apenas ação de controle integral, a relação entre valor de sua saída  $m(t)$  e o erro atuante  $e(t)$  é

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

Sendo  $K_i$  uma constante ajustável.

A ação derivativa antecipa futuros erros e introduz a ação apropriada, produzindo um efeito estabilizante na resposta da malha de controle, tendo como suporte a taxa de variação do erro e dando resposta proporcional a essa variação.

Este tipo de ação nunca poderá ser utilizado sozinha, pois sua ação é dependente da presença das ações proporcional ou integral e ser apenas efetiva durante intervalos de tempo transitórios.

Sendo um controlador PID a combinação dos três tipos de ações corretivas, a relação de seu sinal de saída  $m(t)$  com o erro atuante  $e(t)$  é dada pela equação

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

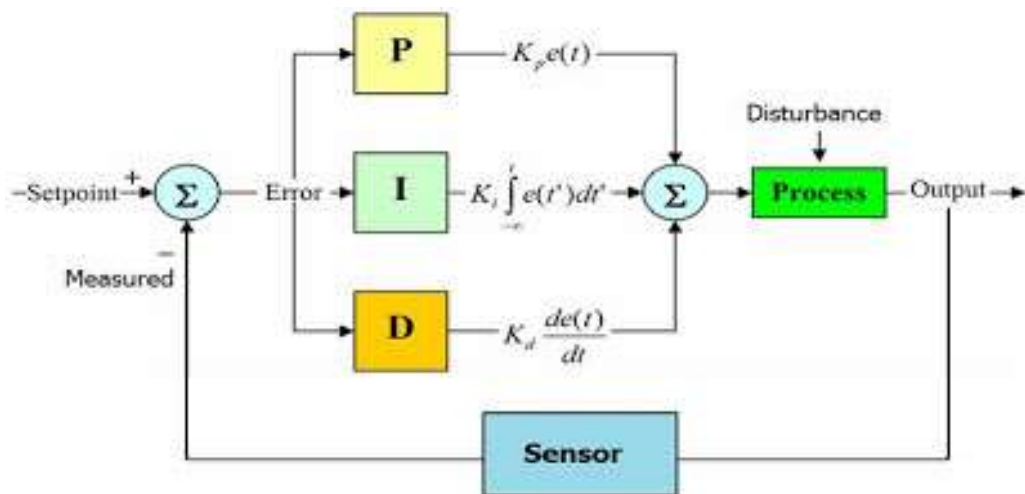
Cada um desses parâmetros é ajustado de forma a obter a melhor resposta do controlador aos distúrbios ocasionados no processo. Sendo a constante  $K_p$  referente a ação proporcional,  $T_i$  a ação integral e  $T_d$  a ação derivativa.

As Figs. 13 e 14 ilustram um diagrama de funcionamento de um controlador PID e a resposta típica para uma entrada em degrau, respectivamente.

Para o controle dos processos, é preciso definir o tipo de ação do controlador PID, como será calculado o erro atuando no sistema, ou seja, a diferença entre PV e SP. Existem dois tipos de ação do controlador:

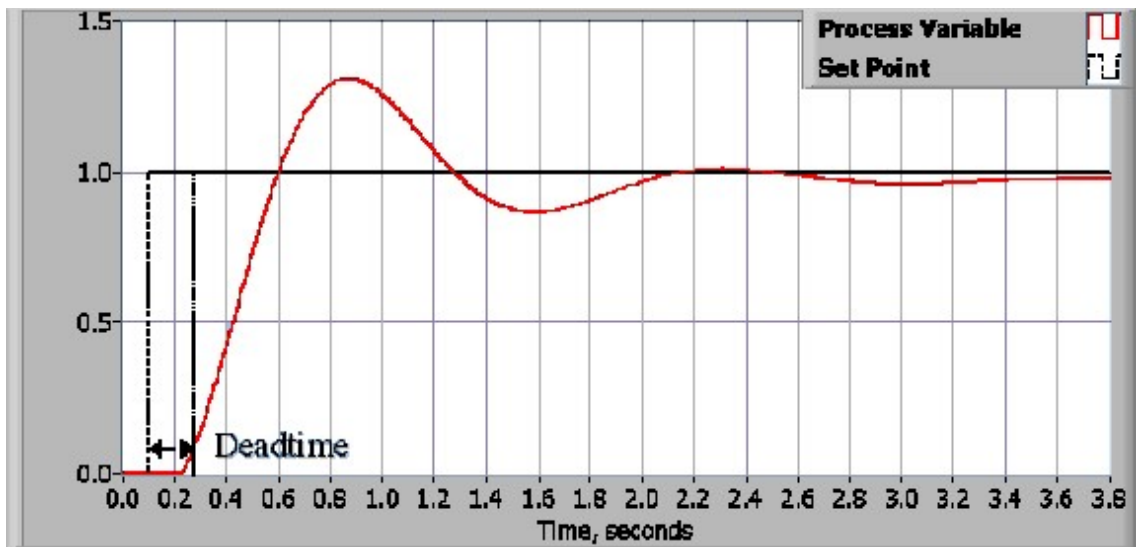
- Direta.
- Reversa.

Figura 13 – Diagrama de blocos controlador PID



Fonte - <http://arduinobymyself.blogspot.com.br/2013/04/controle-de-luminosidade-com-arduino-pid>  
< acessado em 03/07/2017 >

Figura 14 – Curva de resposta ideal de um controlador PID



Fonte - <http://www.xlgps.com/article/155095.html> < acessado em 03/07/2017 >

O controlador configurado com a ação *direta* fará o cálculo do erro  $e(t)$  referente a equação

$$e(t) = PV - SP \quad (4)$$

Atuando desta forma, caso a variável de processo PV aumente, a variável manipulada MV aumentará também, e vice-versa. Exemplo: controle do nível de um tanque pela abertura de uma válvula de alimentação de água.

Já configurado em ação *reversa*, o controlador realizará o cálculo do erro  $e(t)$  de acordo com a equação

$$e(t) = SP - PV \quad (5)$$

Atuando desta forma, caso a variável de processo PV aumente, a variável manipulada MV diminuirá e vice-versa. Exemplo: controle do nível de um tanque pela abertura de uma válvula de descarte de água.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Malhas de Controle

Para a realização deste trabalho e atender os objetivos propostos, será feito a construção de malhas de controle responsáveis por atuarem de forma a obtermos as melhores respostas para as variáveis necessárias e correção aos distúrbios externos.

Como abordado no capítulo 2.1 deste trabalho, é necessário a monitoração e controle dos pontos de temperatura e pressão no pé e topo das colunas nos aparelhos de destilação alcoólica.

Serão tomados quatro pontos de medida e controle:

- Pressão de vapor da Coluna A
- Temperatura da bandeja B4 da Coluna B
- Pressão de vapor da Coluna B
- Pressão de vapor da Coluna C

Para realizar o controle desse sistema, será utilizado um controlador do tipo PID por sua boa eficiência em respostas industriais.

Por uma destilaria ser um ambiente de grande agressividade, deve-se ter a presença de um equipamento robusto e compacto, por ser um sistema menos complexo, tendo apenas quatro variáveis de processo para controle.

Assim, utilizaremos o CONTROLADOR MULTI-LOOP CD600 da empresa Smar, identificado pela Figura 15. Ele se mostra confiável por sua robustez, controle de malha simples, compactação e fácil implementação e manuseio.

As configurações deste controlador nos permitem a criação de quatro loops de controle, tendo indicações em seu painel frontal sobre cada um deles de alarmes, falha, valores de SP – escala de 0 a 100% –, PV – escala de 0 a 100% – e MV – escala de 0 a 100% – em *bar graph*, como a possibilidade de ajuste local dos valores SP, estação Auto/Manual, MV para caso de controle em manual do processo, e dos valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ .

A programação de sua lógica de controle é realizada no Software CONF600 Plus 3.1 e utiliza o conceito de Bloco de Função, combinando no mesmo bloco várias funções relacionadas. Para cada função, existe um número pré-determinado da quantidade que pode existir em sua programação.

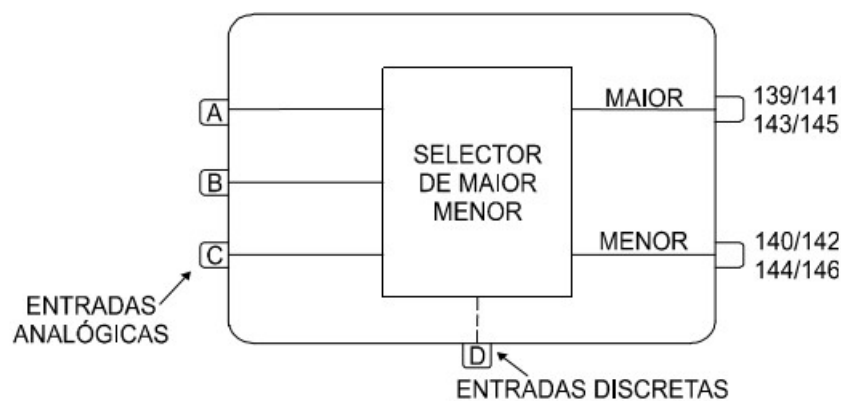
Figura 15 – Controlador CD600



Fonte – Smar

Todos os blocos disponíveis estão pré-ordenados e para a criação da lógica basta apenas configurar os ajustes e parâmetros de cada bloco e interliga-los referenciando o caminho de qual saída do sinal do bloco para a entrada do próximo. A Figura 16 mostra um exemplo genérico de um bloco de função utilizado pelo CD600.

Figura 16 – Bloco de Função típico



Fonte – Smar

Detalhes sobre o controlador e os blocos de funções utilizados neste trabalho estão descritos no Anexo A.

### 3.2 Controle de Pressão

Para realizar o controle de pressão na base das colunas A, B e C, é necessário controlar a injeção de vapor no pé de cada coluna, por questões de segurança e porque esse vapor será responsável pela retirada de álcool do vinho. Assim, essa malha realizará a manipulação da abertura da válvula de entrada de vapor. Neste processo, quanto maior a quantidade de vinho entrando na coluna A, maior será a carga necessária de vapor. Conseqüentemente, um aumento da pressão no interior da coluna.

O *setpoint* da pressão da coluna A deverá ser sempre maior que a pressão da B, que por sua vez é maior que a da C, pois a transferência de substâncias de uma para a outro ocorre justamente por esta diferença de pressão. Caso essa premissa não seja respeitada, acarretará numa queda de temperatura nas bases das colunas e assim, perda significativa de álcool pela vinhaça e flegmaça.

Por se tratar de uma malha dependente da qualidade da linha de pressão de vapor da indústria, apresenta-se como um controle crítico no processo, exposto a muitos distúrbios que podem refletir na qualidade do produto final. Outras questões a serem analisadas para tal é a vazão de entrada de vinho e sua temperatura.

Dessa forma, precisamos de uma aparelhagem composta por um sensor de pressão, que transmitirá este valor ao nosso controlador PID CD600, que, por sua vez, realizará a manipulação da abertura da válvula de vapor de acordo com o *setpoint* estabelecido. Este esquema está ilustrado na Figura 16, valendo para as colunas A, B e C.

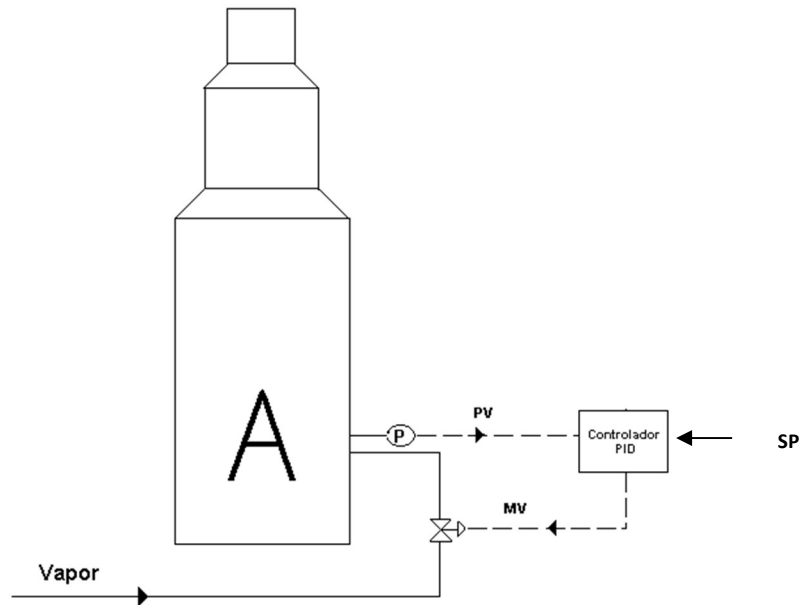
Tendo assim um controle de ação *reversa*, pois com o aumento da pressão do interior das colunas, deve-se diminuir a abertura da válvula.

As variáveis de controle desta malha são:

- SP: Pressão desejável do interior da coluna
- PV: Pressão real do interior da coluna
- MV: Abertura da válvula de injeção de vapor

A Figura 17 ilustra o funcionamento simplificado de uma malha de controle de pressão das colunas A, B e C.

Figura 17 – Esquematização da malha de controle de pressão



Fonte – Autor

### 3.3 Controle de Temperatura

O controle de temperatura destes processos é feito a partir da medição da bandeja B4 da coluna B e realizando a manipulação da válvula de entrada de vinho na coluna A. Esta malha de controle é a principal para a estabilidade e eficiência das etapas de destilação. Quanto maior a temperatura medida na bandeja B4, menor é a quantidade de vinho presente na coluna A, precisando assim repô-la e se ajustar com a pressão de vapor da coluna.

Este controle deve ser bem refinado, pois ele que definirá com precisão a quantidade de produção do etanol e o teor alcoólico dos produtos finais obtidos da destilação, retificação e desidratação. Com temperaturas acima da necessária, teremos uma baixa produção de etanol, devido à baixa quantidade de vinho no aparelho. Com temperaturas abaixo da necessária, teremos um volume muito grande de vinho no aparelho, acarretando também na perda significativa de álcool pela vinhaça de flegmaça.

O grande obstáculo do ajuste deste controle é por se tratar de um monitoramento de temperatura. Esta estratégia de regulação se mostra extremamente lenta com relação aos outros tipos de controle, afetando diretamente no resultado final caso ocorra pequenas variações de temperatura. Isso acontece porque o efeito da variação da entrada de vinho na coluna A demora

para se refletir na temperatura das bandejas do aparelho de destilação. Característica, esta, presente em todos processos com controle de temperatura.

Para esta malha, necessitaremos de uma aparelhagem composta por um sensor de temperatura – muito comum a utilização do sensor PT100 – que transmitirá este valor para o controlador PID CD600, onde será feito o cálculo referente a abertura da válvula de entrada de vinho na coluna A de acordo com o *setpoint* de temperatura estabelecido. Este esquema de controle está ilustrado na Figura 18.

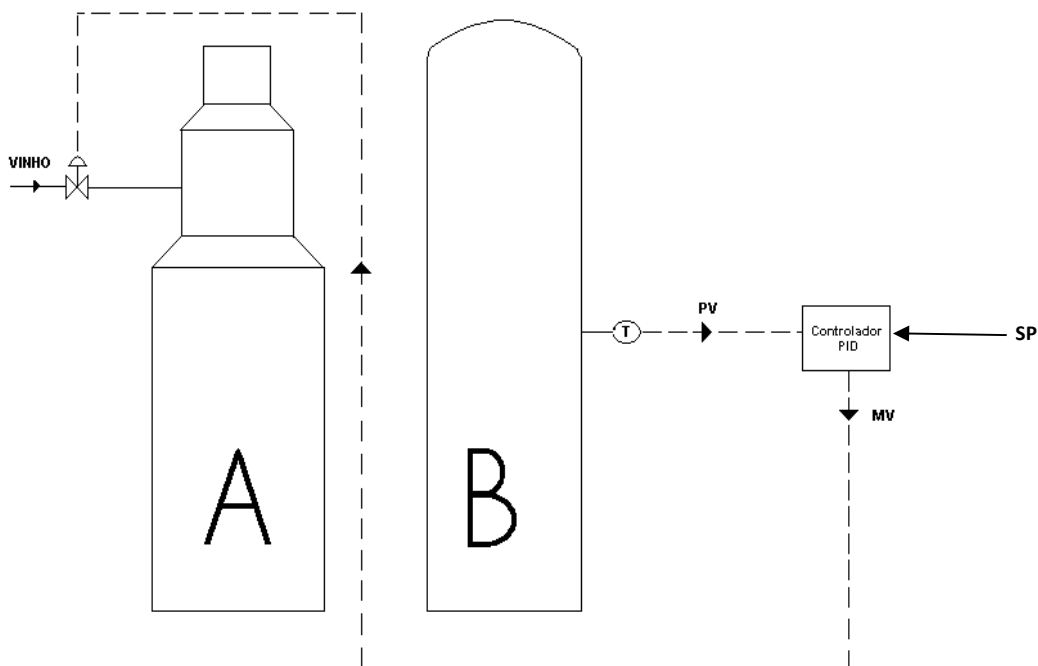
Teremos um controlador configurado em ação do tipo *direta*, pois com o aumento da temperatura na bandeja B4 da coluna B, precisaremos de um aumento na abertura da válvula de entrada de vinho para recarregamento na carga da coluna A.

As variáveis de controle desta malha são:

- SP: Temperatura desejável da bandeja B4
- PV: Temperatura real da bandeja B4
- MV: Abertura da válvula de entrada de vinho

A Figura 18 ilustra o funcionamento simplificado de uma malha de controle de temperatura da bandeja B4 da coluna B.

Figura 18 - Esquematização da malha de controle de temperatura



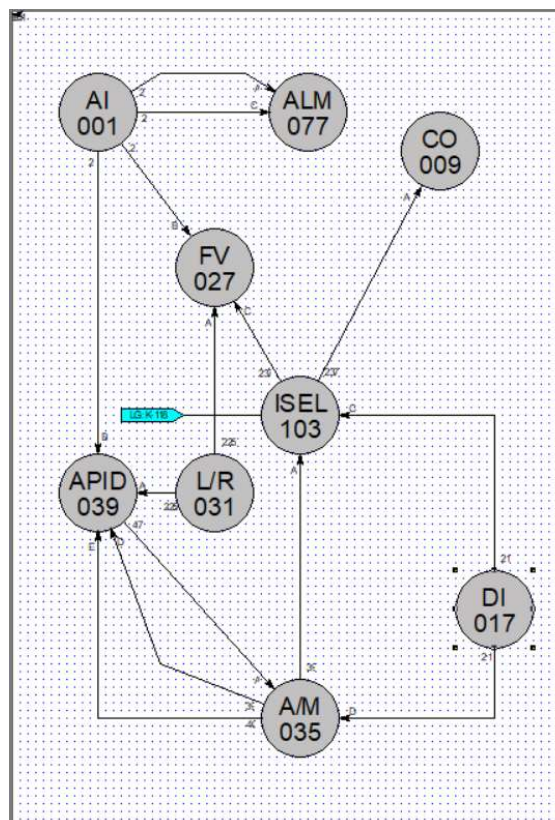
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Pressão de Vapor da Coluna A, B e C

O método de controle e a programação da pressão de vapor das colunas A, B e C são idênticos. Dessa forma, por questões de objetividade do presente trabalho, será descrito apenas a lógica de programação da coluna A, sendo válido também para as colunas B e C. A Figura 19 ilustra a configuração da lógica de programação.

Essa lógica consiste na análise da pressão da coluna através de uma entrada analógica – bloco AI001 – ao CD600. Este valor é mostrado no painel frontal – bloco FV027 – e comparado em um bloco, configurado pelo usuário com valores de máximo e mínimo, de função alarme – bloco ALM077 – que irá alarmar em seu painel frontal caso a pressão ultrapasse os limites.

Figura 19 – Lógica de programação do controle de vapor da Coluna A



Fonte – Autor

A medição de pressão é enviada ao controle do equipamento – bloco APID039 – que realizará a comparação entre a pressão real obtida com a pressão desejada pelo usuário por tipo

de ação *reversa*, inserida no bloco local/remoto – bloco L/R031 – e a correção é enviada em porcentagem (%) de abertura da válvula de vapor da Coluna A à um bloco de saída de corrente – bloco CO009.

A função de estação Auto/Manual – bloco A/M035 – permite a mudança do controle de automático/manual do controlador, sendo que em controle manual o usuário irá inserir nesse mesmo bloco a porcentagem (%) da abertura da válvula de vapor e será transmitido para o bloco de saída. A função de seleção de saída – bloco ISEL103 – é utilizado como um método de segurança em casos de falha na alimentação de energia no controlador, transmitido por um sinal digital – bloco DI017 –, assumindo um valor de saída de segurança configurado pelo programador – bloco K118 no Loop G.

#### **4.2 Temperatura da bandeja B4 da Coluna B**

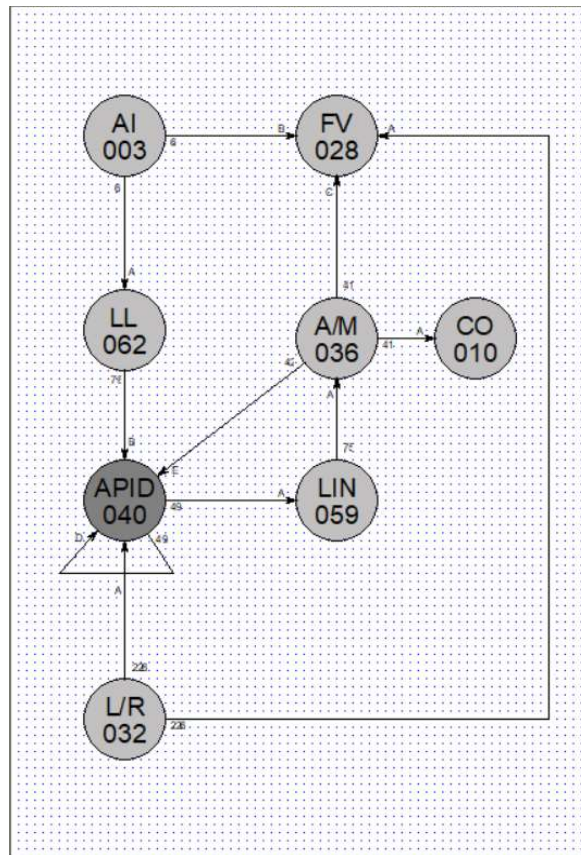
Passando pelo processo de retificação na Coluna A, teremos as malhas de controle na Coluna B. A Figura 20 ilustra a lógica de programação do controle de temperatura da bandeja B4 da Coluna B, através da válvula de entrada de vinho no processo de destilação.

Para realizar este controle, é obtido o valor da temperatura da bandeja B4 em uma entrada analógica – bloco AI003 – e a mesma passa pela função Lead/Lag – bloco LL062 – que irá compensar a diferença da constante de tempo entre a variável controlada e a manipulada, antecipando distúrbios no processo.

Este valor é enviado ao controle do CD600 – bloco APID040 – que realizará a comparação entre a temperatura real obtida com a temperatura desejada pelo usuário por tipo de ação *direta*, inserida no bloco local/remoto – bloco L/R032 – e a correção é enviada em porcentagem (%) da correção necessária. Porém este valor não retrata a real correção necessária, pois o controlador avalia apenas o ajuste do valor de temperatura na coluna B, sendo que a variável manipulada deste processo é a vazão de entrada de vinho na coluna A.

Assim, é adicionado uma função de linearização – bloco LIN059 – que realizará a relação entre ajuste de temperatura com a porcentagem (%) de abertura da válvula de entrada vinho de acordo com uma curva estabelecida pelo programador na função curva de linearização – PNT109 no Loop G.

Figura 20 – Lógica de programação do controle de temperatura da bandeja B4



Fonte – Autor

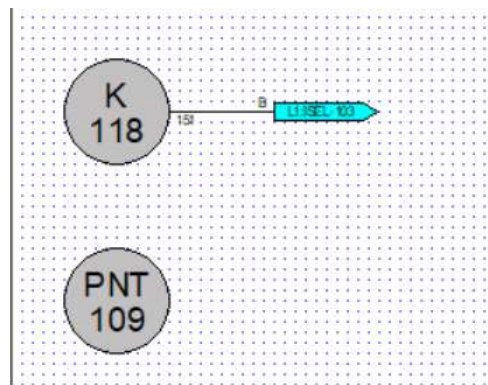
Feito esta relação, o valor é enviado para uma função de saída de corrente – bloco CO010 – definindo a variável manipulada deste processo. A função de estação Auto/Manual – bloco A/M036 – permite a mudança do controle de automático/manual do controlador, sendo que em controle manual o usuário irá inserir nesse mesmo bloco a porcentagem (%) da abertura da válvula de entrada de vinho.

### 4.3 Loop Geral

O Loop Geral – Loop G – é um ambiente de configuração no software CONF600 que contém apenas blocos que podem ser utilizados por mais de uma malha de controle e de forma indireta. Eles são configurados e aplicados na programação das malhas, dentro dos ajustes dos devidos bloco de função. No caso deste trabalho, os blocos utilizados no Loop G foram o de constantes – K118 – e de curva de linearização – PNT109.

O bloco K118 é usado para definir o valor de segurança da válvula de vapor para controle da pressão nas colunas A, B e C em caso de falha do controlador. O bloco PNT109 é utilizado para realizar a relação entre temperatura da bandeja B4 e a abertura da válvula de entrada de vinho na coluna A. A Figura 21 ilustra o ambiente do Loop Geral.

Figura 21 – Ambiente do Loop G



Fonte – Autor

## 5 CONCLUSÃO

Foi realizado o estudo do processo de destilação das indústrias sucroalcooleiras, tendo aprendido os pontos importantes para produzir métodos de comando em automático do processo, melhorando a eficiência e a segurança do mesmo. Verificou-se que a melhor maneira para realizar estes controles é usando pontos de pressão e de temperatura das colunas dos aparelhos de destilação. Utilizando equipamentos de controle PID, é possível administrar essas variáveis de uma forma simples e compreensível. Assim, criou-se malhas de programação em linguagem de blocos livres de um controlador PID, baseando-se nos conceitos de controle de variáveis, comparações de erros e configurações de funções aprendidos durante a graduação. No entanto, o controlador utilizado para realização deste trabalho, apesar de se apresentar eficiente, simples e robusto por sua programação e para o tipo de trabalho realizado – produção contínua de etanol –, mostrou-se defasado com relação a recursos de simulação, monitoramento e velocidade no tempo de resposta, que foi evoluído com o desenvolvimento de equipamentos mais modernos e tecnologias mais avançadas de controle e programação.



## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, André Ribeiro Lins de; POLICASTRO, Cláudio Adriano. **Automação e controle em aparelhos de destilação de álcool – Uma visão crítica.** Universidade de São Paulo. 2007. 9 f.

CARMO, Marlon José do; GOMES, Francisco José. **Sintonia de Controladores e Análise Funcional de Malhas de Industriais em Ambiente Multifuncional Integrado.** In: Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, XXXIII. 2005. Pernambuco.

FATEC. **Apostila Açúcar e Álcool.** Material Bibliográfico utilizado em disciplinas da Faculdade de Tecnologias e Ciências. 2006. 153 f.

PAYNE, John Howard. **Operações Unitárias na Produção de Açúcar de Cana.** Nobel/STAB. 1ª ed. 1989.

OGATA, Katsuhiko. **Modern Control Engineering.** Editora Prentice/Hall do Brasil Ltda. 1ª ed. 1982. 915 f.

RIBEIRO, Paulo Roberto. **A Usina de Açúcar e sua Automação.** Smar. 2ª ed. 2003. 143 f.

SALLA, Álvaro. **APLICAÇÕES DE TROCADORES A PLACAS NA USINA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL.** GEA do Brasil Intercambiadores. 2005. 36 f.

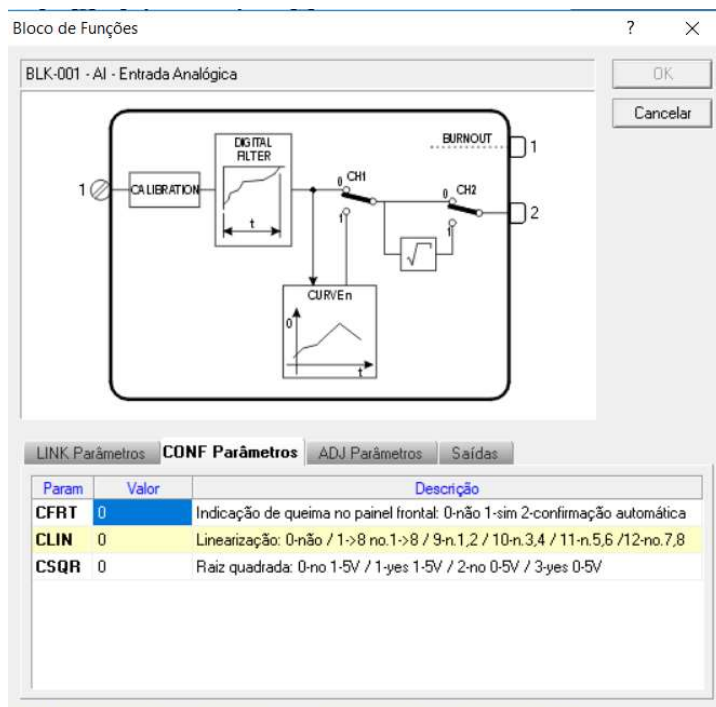
Smar Laboratories Corporation. **CD600 - Manual de Instruções, Operação e Manutenção.** 2003. 39 f.

TEIXEIRA, Paulo Roberto Frade. **Ações de Controle em Malha Fechada.** 2012. 36 f. Curso de Instrumentação Industrial. ISA.

## ANEXO A

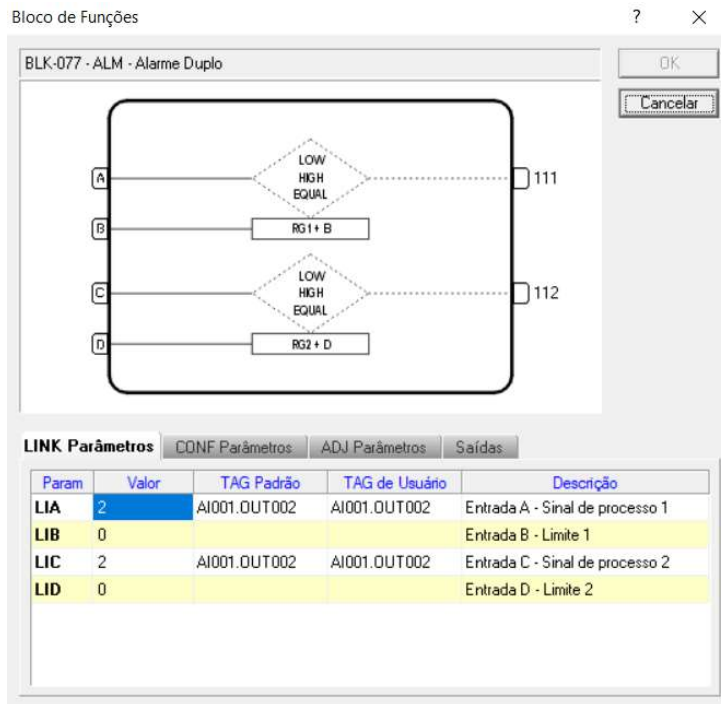
Para melhor entendimento de cada bloco de função da linguagem de programação, as Figuras a seguir indicam o funcionamento de cada Bloco de Função utilizado pelo controlador CD600.

Figura 22 – Entrada Analógica (AI)



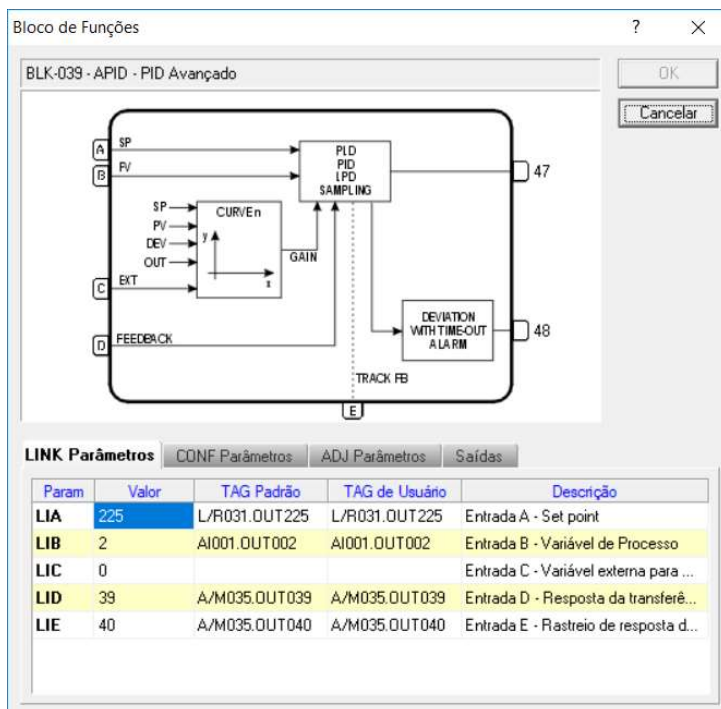
Fonte – Smar

Figura 23 – Alarme Duplo (ALM)



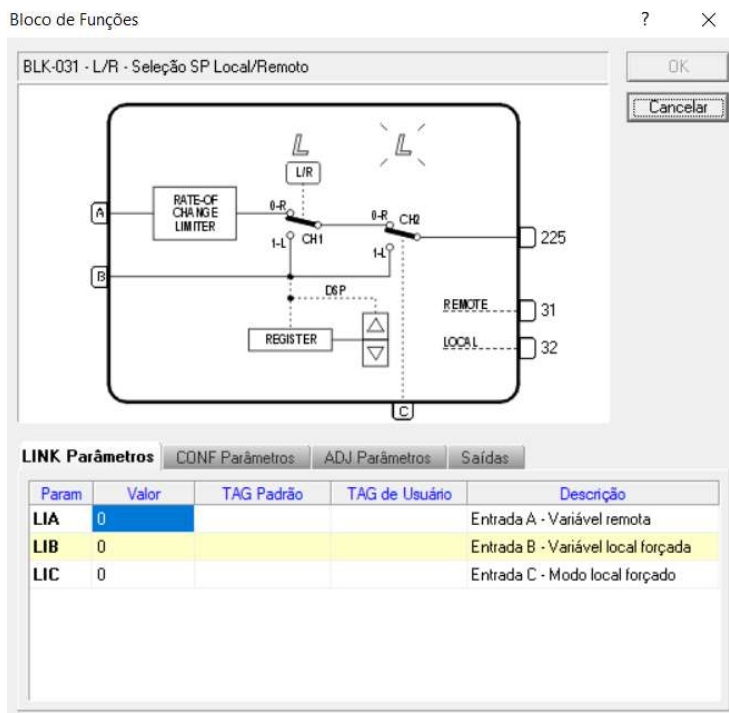
Fonte – Smar

Figura 24 – PID Avançado (APID)



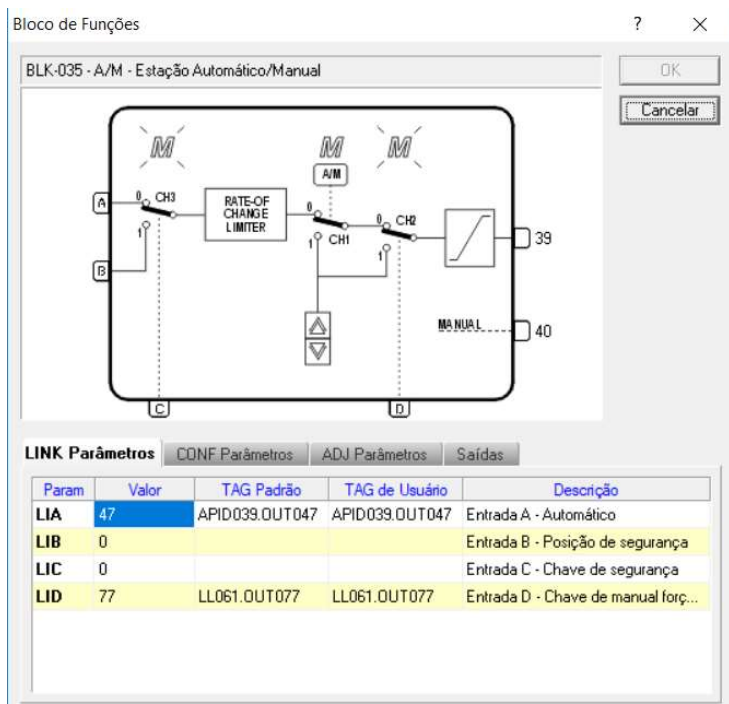
Fonte – Smar

Figura 25 – Seleção SP Local/Remoto



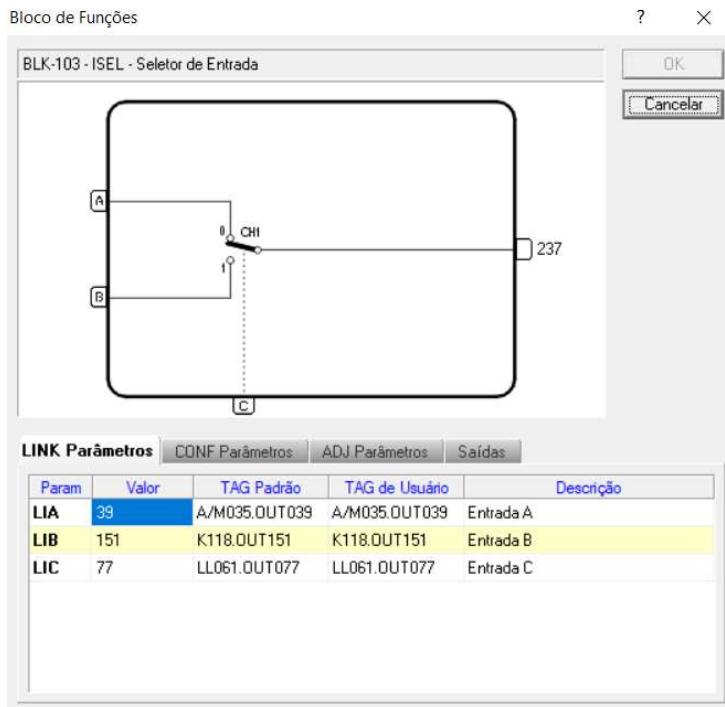
Fonte – Smar

Figura 26 – Estação Automático/Manual



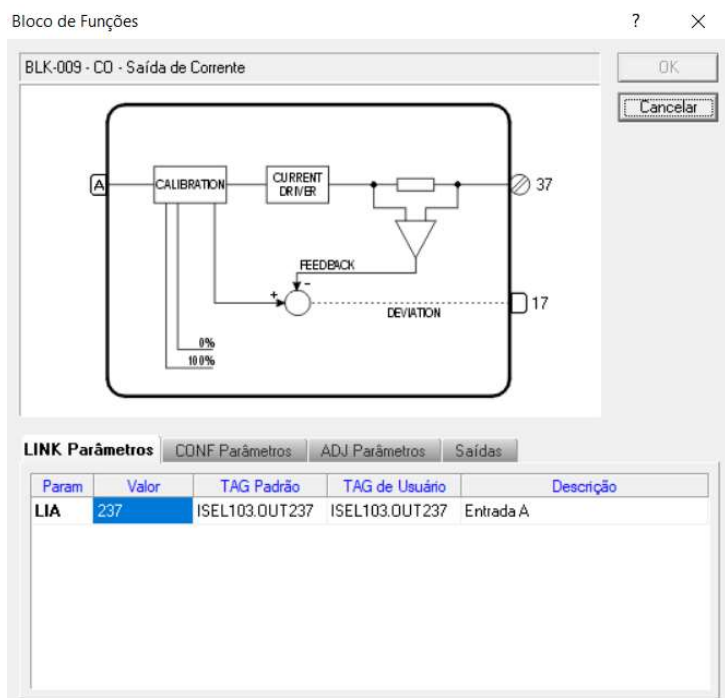
Fonte – Smar

Figura 27 – Seletor de Entrada



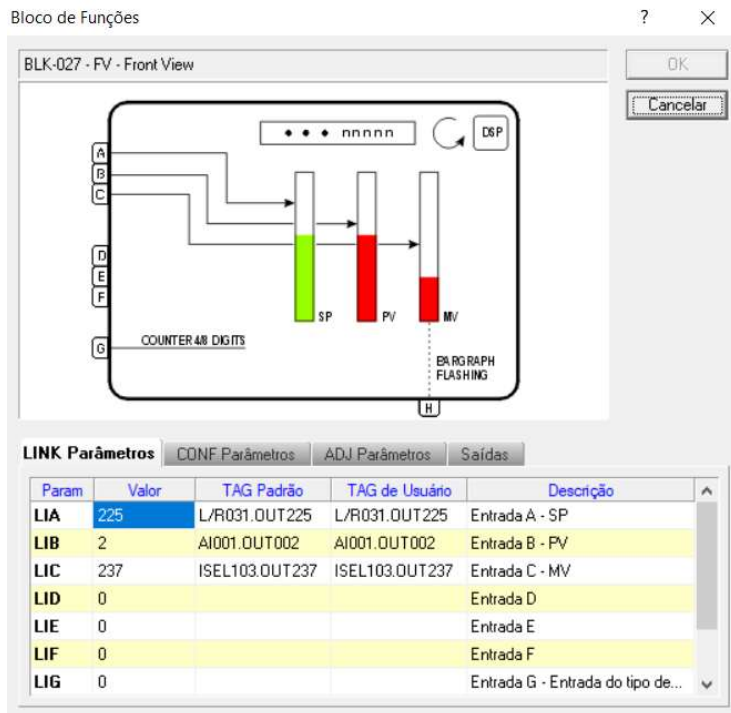
Fonte – Smar

Figura 28 – Saída de Corrente



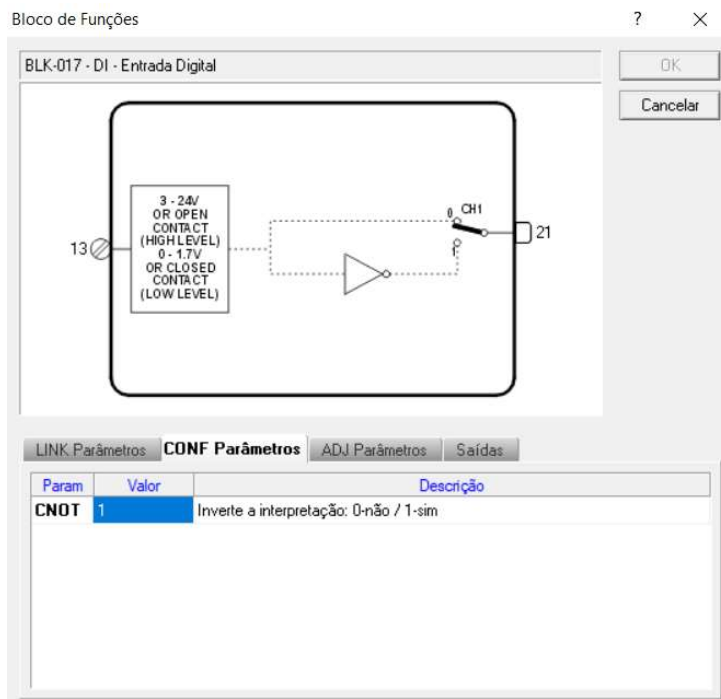
Fonte – Smar

Figura 29 – Front View



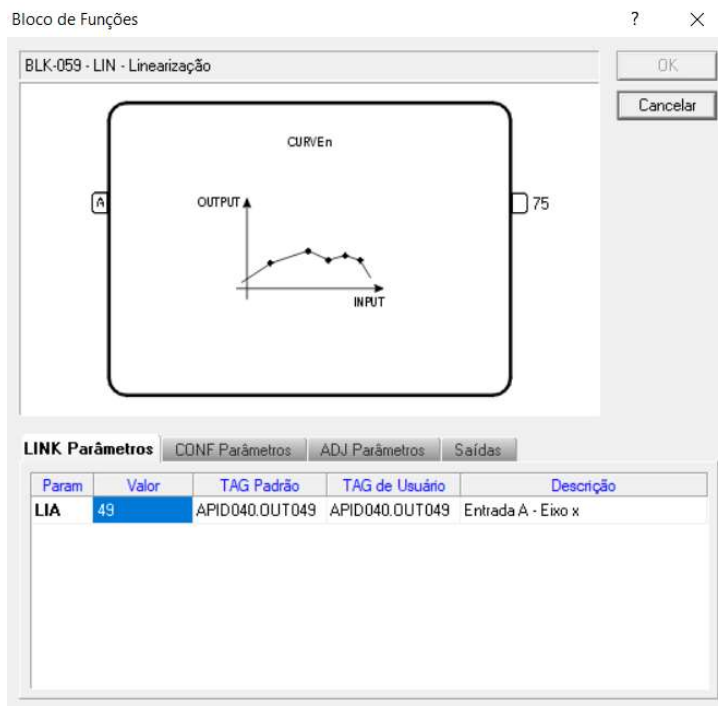
Fonte – Smar

Figura 30 – Entrada Digital



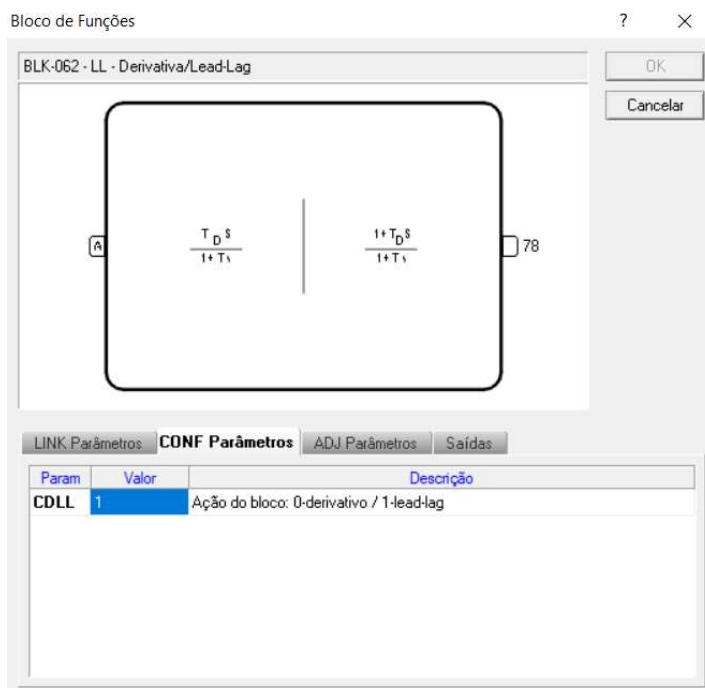
Fonte – Smar

Figura 31 – Linearização



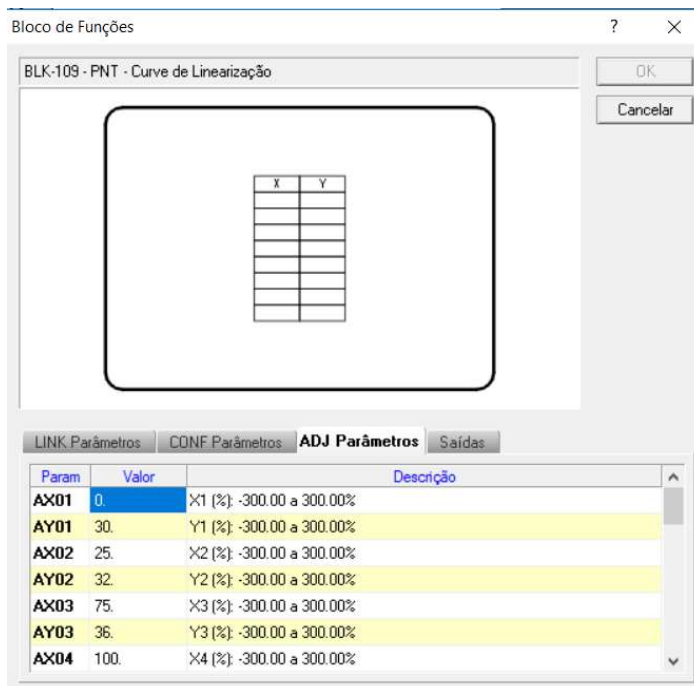
Fonte – Smar

Figura 32 – Derivativa/Lead-Lag



Fonte – Smar

Figura 33 – Curve de Linearização



Fonte – Smar

Figura 34 – Constantes



Fonte – Smar