

MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA O PROCESSO INDUSTRIAL DE FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

Armando José Dal Bem
Gilberto H. A. Koike

Virgolino de Oliveira S/A Açúcar e Álcool

Luís Carlos Passarini
EESC-USP

Resumo

Apresenta um modelo de simulador baseado em planilha eletrônica acessível e simplificada, no caso o Excel, que fornece uma previsão de produção, mostrando a combinação mais econômica, entre açúcar e álcool, em função de custos de produção, eficiências e demais variáveis que se tenha por histórico, ou estimada, de uma planta industrial qualquer, já existente, ou de parâmetros técnicos conhecidos.

Palavras-chave: fabricação de álcool, fabricação de açúcar, simulação para produção de álcool e açúcar, fermentação alcoólica, extração de açúcar, destilação alcoólica.

Introdução

O processo de fabricação de açúcar e álcool visa, sinteticamente, à extração do caldo contido na cana, seu preparo e “concentração”, culminando nos vários tipos de açúcares conhecidos, como: demerara, mascavo, cristal, refinado, líquido, VHP, etc. O mesmo caldo, preparado de forma específica, resulta, através da fermentação microbiológica, com posterior destilação, no álcool etílico, fornecido nas opções: anidro ou hidratado.

Dentro desse processo de fabricação, podemos classificar uma usina de açúcar como uma indústria de extração, uma vez que o açúcar já é produzido pela natureza, através da cana, sendo ele somente concentrado no processo, nas suas várias modalidades. Já a indústria do álcool, pelo processo que passa, podemos classificá-la como uma indústria de transformação, cabendo esse papel à fermentação biológica alcoólica. O fluxograma da Figura 1 mostra, sucintamente, as fases de fabricação do açúcar e do álcool.

Objetivo

A produção está inserida em área agrícola e industrial, estando sujeita às condições, primeiro, ambientais, que influenciam de forma dramática a qualidade da matéria-prima, provocando ampla variação de seus parâmetros técnicos e de fornecimento. Em segundo, a produção apresenta elevado grau de complexidade, pois envolve equipamentos

dos mais variados tipos e tamanho, geração de energia e processos químico, físico e biológico.

Esse ambiente, somado à variação do mercado, exige dos profissionais constantes ações de interferência no processo que, não tendo o conhecimento rápido e preciso do seu efeito nos produtos finais, incorrem em subaproveitamento de equipamentos, perda de eficiência e subfaturamento. Além dos efeitos pontuais na produção, o planejamento da “safra” como um todo carece de uma ferramenta que auxilie de forma eficaz. Assim, o desenvolvimento dessa ferramenta é a proposta deste trabalho.

Metodologia

Conceitos e definições

Alguns conceitos e definições básicos são necessários para homogeneizar a linguagem deste trabalho. Entre eles destacam-se:

- Glucose e frutose: são os açúcares que compõem a cana em menor quantidade. A partir delas só é possível a fabricação do álcool, uma vez que elas não sofrem o processo de cristalização.
- Sacarose: é o açúcar mais importante e sintetizado em maior quantidade pela cana. A partir dela é possível fabricação de açúcar em forma de cristais, assim como álcool.

- Fibra: é a parte sólida da cana formada pela celulose, lignina, vasos lenhosos, etc.
- POL: é definida como a quantidade de sacarose, em porcentagem, presente na cana ou no caldo da cana.
- Açúcares redutores (AR): é a quantidade de massa de glucose e frutose presente na cana, em porcentagem.
- Açúcar Redutor Total (ART): fornece a quantidade de açúcar total: sacarose, frutose e glucose existentes na cana, em porcentagem.
- Sólidos solúveis: são todos os sólidos que se encontram dissolvidos no caldo da cana. Entre eles estão os açúcares, ac. orgânicos, amidas, sais, gomas, pectinas, ceras, proteínas, etc.
- Brix: fornece a quantidade de sólidos solúveis contidos no caldo em porcentagem.
- Pureza: é definida como a quantidade de *sacarose* presente no caldo em relação ao total de sólidos solúveis.
- Impurezas minerais: são os detritos minerais carregados com a cana, na operação de corte e carregamento, provenientes do solo.
- Impurezas vegetais: são as impurezas de origem vegetal, provenientes da própria cana e de outras culturas que competem com ela.
- Recuperação: fornece a quantidade de sacarose que é extraída do caldo. O subproduto do processo de fabricação

de açúcar é o mel, cujos componentes principais são os açúcares redutores (glucose e frutose) e uma quantidade remanescente de sacarose. Uma alta recuperação significa extrair grande quantidade dessa sacarose.

- Viabilidade: é uma medida da quantidade de levedura (microrganismo que promove a fermentação) viva no meio do caldo.
- Teor alcoólico: indica a quantidade de álcool presente numa solução. Essa medida é expressa em graus GL.
- Laboratório PCTS: laboratório para análise químico-física da cana.
- Perdas indeterminadas: perdas de ART de difícil determinação e localização, mas que, segundo Bayma (1974), podem ser medidas de maneira global, pela diferença entre o ART que entrou na usina, os produtos e as perdas cujos valores e localização são conhecidos.

Dinâmica da montagem do simulador

A construção do simulador deve calcular o fluxo de massa e o volume ao longo das fases do processo. O fluxo de massa está vinculado principalmente ao açúcar e é chamado de balanço de ART, já o volume está vinculado à capacidade dos equipamentos.

Dentro do balanço de ART estão embutidas as perdas de açúcar em cada fase do processo. Elas são medidas em *porcentagem*, em relação ao total de açúcar que entra.

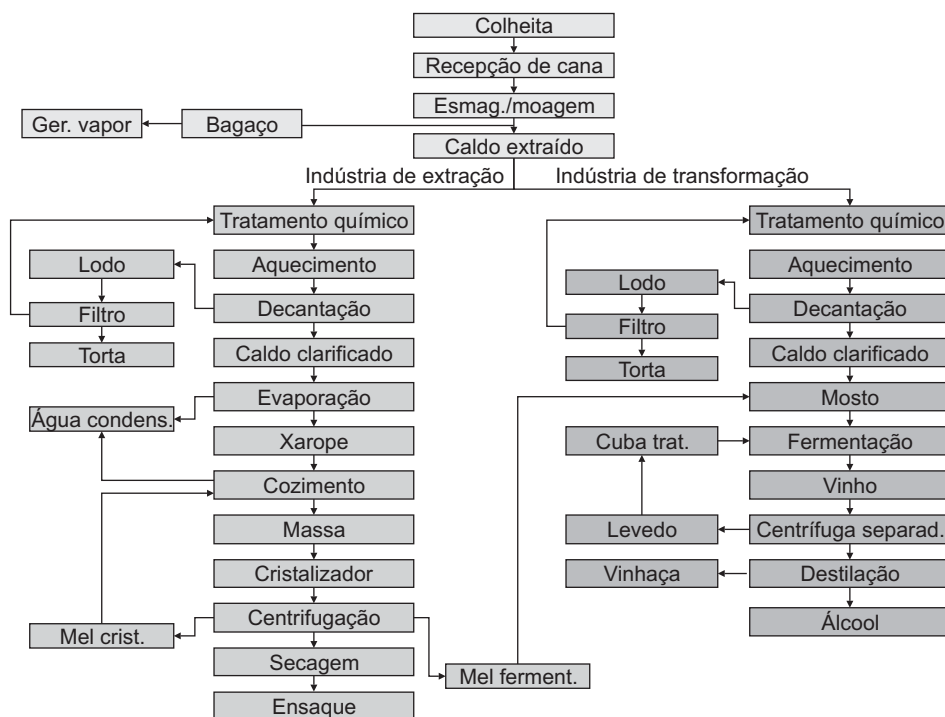


Figura 1 Fluxograma de fabricação de açúcar e álcool.

Para o entendimento do balanço de ART, será utilizado o conceito de volume de controle da termodinâmica clássica (Wilén & Sonntag, 1976), que descreve o cruzamento de massa e energia em uma fronteira imaginária ao redor de um processo.

A aplicação desse conceito, neste trabalho, será feita em toda fase do processo que houver entrada ou saída de alguma espécie de massa e, principalmente, onde houver perda de ART que seja possível determinar, *agrupando as fases em que esses fatores não ocorram*.

Analisando a fronteira imaginária ao redor de uma indústria sucroalcooleira, o fluxo de massa e energia que cruza o volume de controle é mostrado, qualitativamente, na Figura 2.

Dentro da maioria das indústrias sucroalcooleira é produzida, ainda, através da queima do bagaço da cana, energia na forma de vapor, e esta é utilizada para movimentar turbinas, realizar aquecimentos e produzir energia elétrica. Dependendo do consumo e da produção, a energia elétrica pode cruzar a fronteira, sendo vendida ou comprada.

Outro cruzamento da fronteira imaginária, que surgiu recentemente, é a produção de levedura (microrganismo utilizado na fermentação alcoólica). Ela pode ser produzida em quantidades maiores que o necessário ao processo e, assim, abastecer a indústria alimentícia, como fermento e alimentação animal.

Para este trabalho, não tem significado o cruzamento da fronteira por energia e por massas que não estejam relacionadas com o ART, ou ao volume do fluxo utilizado para a capacidade dos equipamentos. Apesar disso, será feita uma *análise qualitativa/gráfica* da massa, ou volume,

dos componentes da cana, mesmo que não interfiram no balanço de ART.

Com o objetivo de rastrear o ART e os volume do fluxo, o trabalho apresentará as equações matemáticas deduzidas, ao longo do processo, relacionando suas variações, sempre que possível, aos dados *originais da cana* e aos *parâmetros técnicos* de cada fase.

Balanço de ART e perdas no processo de fabricação de açúcar

Recepção de cana

A quantidade de cana pesada e o ART medido são as variáveis que fornecem a quantidade de açúcar que entrou na usina.

Até a descarga, incidem como *perda indeterminada* aquelas derivadas da queda de cana e pisoteio por caminhões e máquinas que operam no pátio de descarregamento, esmagamento em garras e cabos dos equipamentos de descarga e perda por decomposição da sacarose devido ao tempo de espera.

A perda significativa e conhecida nessa fase é aquela que ocorre no processo de limpeza da cana, processo este necessário quando a quantidade de impurezas minerais carregadas junto com a cana atinge valor prejudicial ao processo de fabricação.

Um volume de controle na fase de recepção de cana é esquematizado na Figura 3.

Note que a massa de cana está “explodida” nos componentes que a compõe, sendo a massa de sólidos insolúveis partida em massa de ART e *sólidos solúveis parciais*, representando os demais.

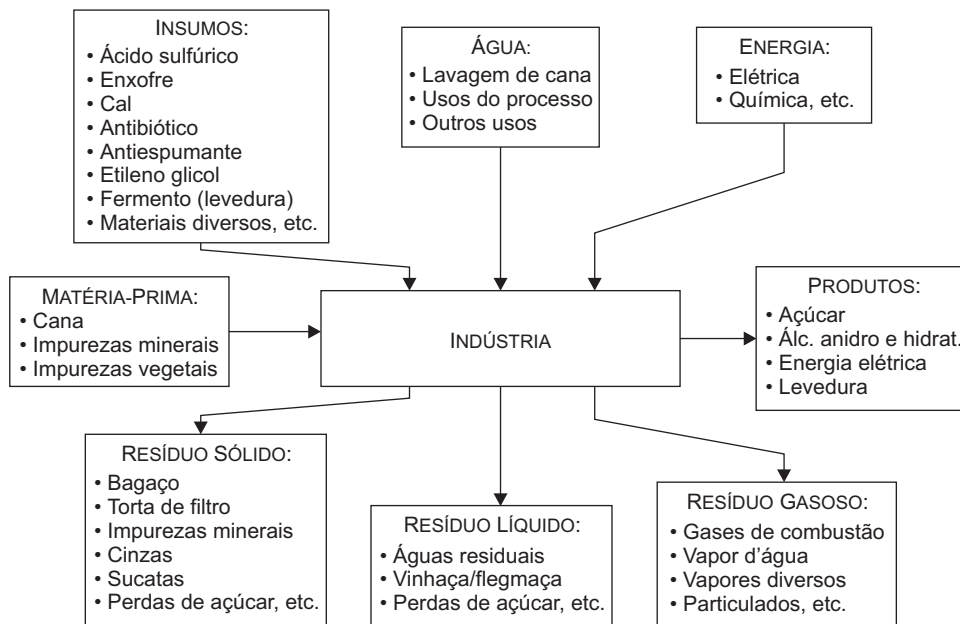


Figura 2 Esquema simplificado do fluxo de massa e energia de processo industrial.

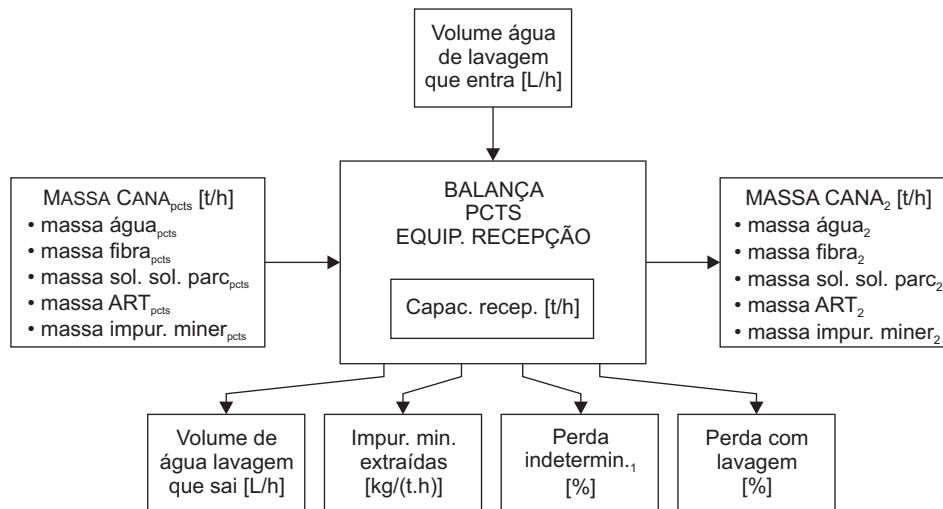


Figura 3 Balanço de ART na fase de recepção de cana.

O resultado do balanço de sacarose nesta fase é dado pela equação:

$$m_{\text{ART}2} = \text{ART} \cdot m_{\text{cpcts}} \cdot (1 - P_{\text{ir}}/100 - P_{\text{L}}/100)/1000$$

em que:

$m_{\text{ART}2}$ = fluxo de massa de ART que sai da fase de recepção [t/h];

P_{ir} = perda indeterminada na recepção;

P_{L} = perda na lavagem.

Extração

Na extração é importante destacar a embebição e a diferença entre os tipos de caldos extraídos pela moenda

(espargimento de água sobre a cana moída). Para isso observe a Figura 4.

O caldo primário, como pode ser visualizado pela figura, é aquele extraído do primeiro terno isoladamente e o secundário, aquele extraído do segundo, sendo acumulado a ele o caldo dos demais ternos, mais a embebição. O caldo misto, por sua vez, é a mistura dos dois.

Nesta fase ocorre a *perda na extração*, propriamente dita, que é resultante da incapacidade da moenda em extrair o total de açúcar da cana, e a *perda indeterminada*, resultante de decomposição da sacarose, atividade microbológica e vazamentos em geral. O volume de controle esquematizado na Figura 5 mostra o equilíbrio de massa.

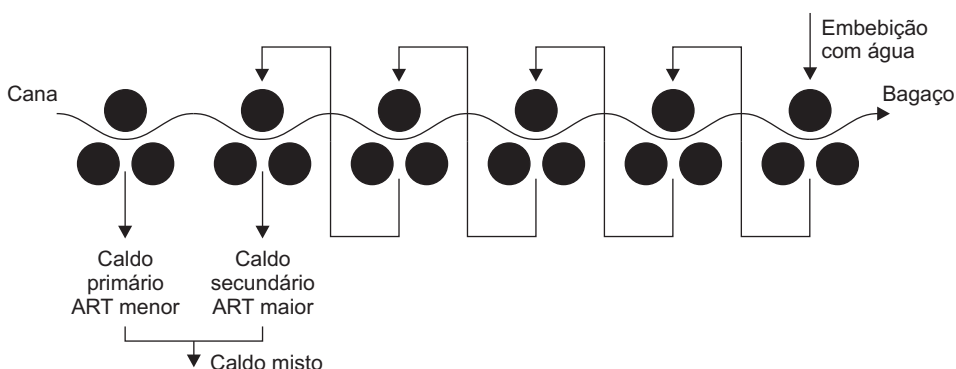


Figura 4 Esquema de extração de caldo de moenda de 6 ternos.

O fluxo de massa de ART e o volume do caldo são dados, respectivamente, por:

Caldo primário

$$m_{ARTcp} = ART \cdot m_{cpcts} \cdot [E_{ept} \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iept}/100]/1000$$

em que:

- m_{ARTcp} = fluxo de massa de ART no caldo primário [t/h];
- E_{ept} = eficiência de extração do primeiro terno [%];
- P_{iept} = perda indeterminada de massa de ART no primeiro terno.

$$v_{cp} = [E_{ept} \cdot m_{cpcts} \cdot (1 - fibra_{pcts}/100 - Im_{pcts}/100) + m_{fcp} + m_{imcp}] / \rho_{cp}$$

em que:

- v_{cp} = volume do fluxo do caldo prim. [m³/h];
- ρ_{cp} = densidade do caldo prim. [t/m³];
- $fibra_{pcts}$ = quantidade de fibra do PCTS [%];
- m_{fcp} = fluxo massa fibra caldo prim. [t/h];
- m_{imcp} = fluxo de massa de impurezas minerais do caldo prim. [t/h].

Caldo secundário

$$m_{ARTcs} = ART \cdot m_{cpcts} \cdot 1000 \cdot [(E_{et} - E_{ept}) \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iest}/100]$$

em que:

- m_{ARTcs} = fluxo massa de ART no caldo secund. [t/h];
- E_{et} = efc. extração total [%];

P_{iest} = perda indeterminada de massa de ART nos ternos subsequentes.

$$v_{cs} = [(E_{et} - E_{ept}) \cdot m_{cpcts} (1 - fibra_{pcts}/100 - Im_{pcts}/100) + m_{fcs} + m_{imcs}] / \rho_{cp} + v_{ae}$$

em que:

- v_{cs} = vol. fluxo caldo secund. [m³/h];
- m_{fcs} = fluxo massa fibra caldo secund. [t/h];
- m_{imcs} = fluxo de massa de impurezas minerais do caldo secundário [t/h].
- v_{ae} = vol. fluxo da água de embebição [m³/h];

Clarificação do caldo

A clarificação visa à obtenção de um caldo livre de impurezas. Para esse objetivo estão envolvidas as etapas de peneiragem, tratamento químico, aquecimento, decantação e filtragem do caldo, conforme pode ser visualizado pela Figura 6.

Para a clarificação é adicionada cal, na forma de leite de cal, e, portanto, um volume determinado de água se junta ao processo. A maioria das usinas não possui um método para medir a sua vazão, sendo adicionada água à cal, de maneira empírica, até obter suspensão visualmente estabilizada. Porém, a quantidade de cal utilizada é precisamente conhecida, podendo ser atrelada à quantidade de cana moída ou à quantidade de açúcar produzido. De acordo com Cesar & Delgado (1977), a massa de água para completar a reação química para “extinção” e obtenção de uma suspensão grosseira de cal é da ordem de 3,5 vezes a massa de cal. Portanto, a massa de cal é um dado de entrada do simulador.

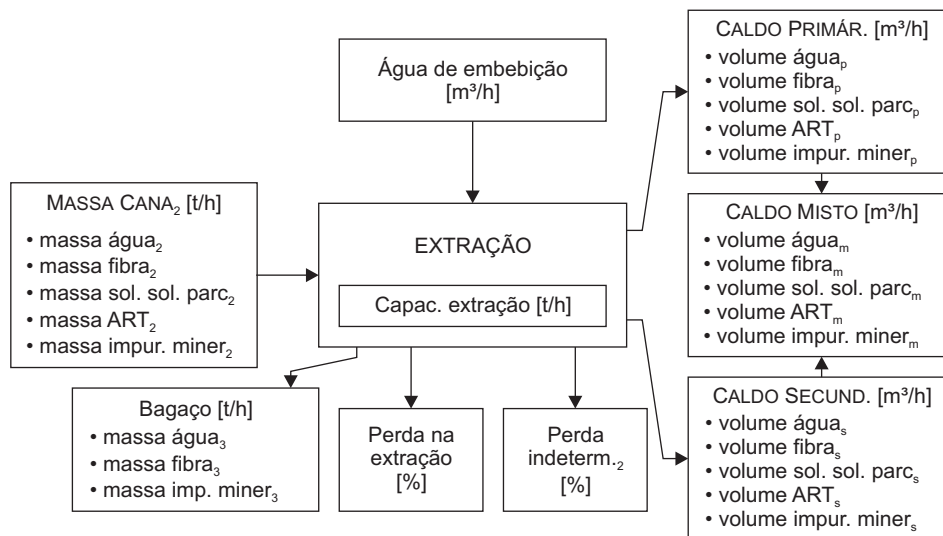


Figura 5 Balanço de ART na fase de extração.

O mesmo acontece com o volume do fluxo de água existente na torta de filtro. A torta de filtro é um subproduto do processo, fruto da filtração do lodo decantado durante a clarificação do caldo. Essa água, por conter açúcar, deve ser retirada da torta de filtro e retornar ao processo. Ela é determinada em função de outras duas variáveis: fluxo de massa da torta, que normalmente é medida em tonelada/hora, e umidade da torta, que é medida por amostragem. Essas duas variáveis também fazem parte dos dados de entrada do simulador.

Outra variável que adiciona volume ao caldo é a água de embebição do lodo (impurezas retiradas pelos equipamentos de decantação) como agente facilitador de filtração. Ela normalmente é conhecida ou estimada e entra na simulação como um dado primário.

As perdas de açúcar envolvidas, aqui, estão relacionadas ao arraste pela *torta de filtro* e pela *perda indeterminada* que tem origem nas mesmas causas da evaporação.

O caldo primário é mais rico em ART que o secundário, ou misto, sendo, assim, mais apropriado para a fabricação do açúcar, uma vez que, para sua fabricação, é necessário promover a concentração (elevar o Brix) desse ART ao longo das fases seguintes. Porém, nem sempre ele é direcionado exclusivamente para esse fim. Assim, para determinação do balanço de ART é necessário definir qual tipo de caldo será utilizado na fabricação do açúcar ou do álcool.

Outra definição estratégica a ser tomada é a prioridade de fabricação – álcool ou açúcar – quando a quantidade

de caldo não for suficiente para lotar ambos os processos, ou mesmo um deles isoladamente. Porém, variação na qualidade ou no fornecimento da matéria-prima e problemas operacionais alteram esse equilíbrio. Nestes cenários as estratégias ficam assim classificadas:

A – Prioridade 1: Fabricação de açúcar (destinar o caldo prioritariamente para o processo de fabricação de açúcar e o restante, se houver, para o processo do álcool)

Neste caso há duas opções de escolha de caldo para ser utilizado no processo de açúcar: primário e misto. Apesar de ser uma opção, a escolha de caldo secundário para a fabricação de açúcar não é comumente utilizada e não será considerada.

A.1 – Opção 1: Caldo primário para a fabricação do açúcar

Se o caldo escolhido for o primário é necessário tornar consistente a quantidade de caldo primário extraído e a capacidade dos equipamentos de fabricação de açúcar à frente da moenda. Entretanto, os equipamentos de fases diferentes operam com produtos de concentração e volume diferentes que devem ser ajustados, *relativamente*, ao volume e à concentração do caldo da fase de clarificação. Essa operação é chamada de *capacidade ajustada*, e a consistência deve ser feita para a *menor capacidade máxima de processamento ajustada*, denominada c_a e dada em m^3/h . Ela fornece dois cenários.

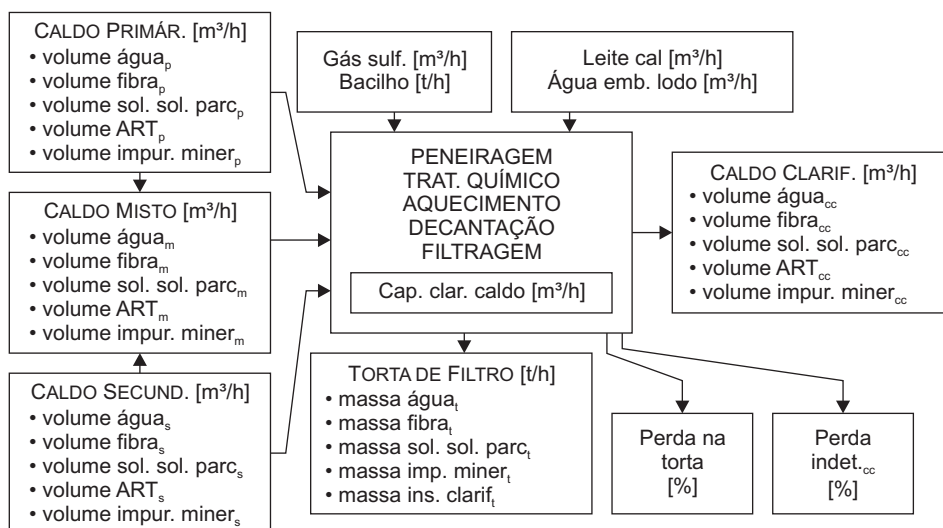


Figura 6 Balanço de ART na fase de clarificação do caldo.

A.1.1 – Volume de caldo primário é suficiente para alimentar a capacidade ajustada dos equipamentos

O simulador deve calcular prioritariamente o volume do caldo primário para o açúcar, em função de c_a .

$$va_{cc11s} = c_a$$

em que:

va_{cc11s} = volume do fluxo de caldo clarificado destinado ao açúcar com a adoção da prioridade 1, opção 1 e volume de caldo primário suficiente [t/h].

O fluxo de massa de ART para o açúcar é dado por:

$$ma_{ARTcc11s} = m_{ARTpts} \cdot \{F_{cp11} [E_{ept} \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iept}/100] - P_{icc}/100 - P_t/100\}$$

em que:

$ma_{ARTcc11s}$ = fluxo massa de ART destinado ao açúcar com adoção da prioridade 1, opção 1 e caldo primário suficiente [t/h];

F_{cp11} = fração caldo primário clarificado, para atender prioridade 1, opção 1 e caldo primário suficiente (variável calculada pelo simulador);

P_{icc} = perda indeterminada de massa de ART;

P_t = perda de ART na torta [%].

O restante do caldo primário, somado ao secundário, é destinado ao álcool. É dado por:

$$val_{cc11s} = (1 - F_{cp11}) \cdot v_{cpc} + v_{csc}$$

em que:

val_{cc11s} = volume do fluxo caldo destinado ao álcool com a adoção da prioridade 1, opção 1 e caldo primário suficiente para abastecer o processo [m³/h];

v_{cpc} e v_{csc} = vol. total de caldo primário e vol. total de caldo secundário, respectivamente. São variáveis calculadas pelo simulador.

A massa de ART destinada ao processo do álcool, por sua vez, é:

$$mal_{ARTcc11s} = m_{ARTpts} \cdot \{(1 - F_{cp11}) \cdot [E_{ept} \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iept}/100] + [(E_{et} - E_{ept}) \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iest}/100] - P_{icc}/100 - P_t/100\}$$

em que:

$mal_{ARTcc11s}$ = fluxo de massa ART destinado ao álcool com adoção da prioridade 1, opção 1 e caldo primário suficiente para abastecer o processo [t/h].

A.1.2 – Volume de caldo primário é insuficiente para alimentar a capacidade ajustada dos equipamentos

O volume do fluxo de caldo clarificado destinado ao processo de açúcar é sempre igual à menor capacidade máxima ajustada dos equipamentos desse processo. Portanto, tem-se:

$$va_{cc11i} = c_a$$

em que:

va_{cc11i} = volume do fluxo do caldo destinado ao açúcar com a adoção da prioridade 1, opção 1 e caldo primário insuficiente para alimentar o processo [t/h].

O fluxo de massa de ART destinado ao açúcar é dado por:

$$ma_{ARTcc11i} = m_{ARTpts} \cdot \{[E_{ept} \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iept}/100] + F_{cs11} \cdot [(E_{et} - E_{ept}) \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iest}/100] - P_{icc}/100 - P_t/100\}$$

em que:

$ma_{ARTcc11i}$ = fluxo de massa ART destinado ao açúcar com adoção da prioridade 1, opção 1 e caldo primário insuficiente para abastecer o processo [t/h].

F_{cs11} = fração de caldo secundário clarificado para atender prioridade 1, opção 1 e caldo primário insuficiente (variável calculada pelo simulador).

O restante do caldo secundário é destinado ao álcool e é dado por:

$$val_{cc11i} = (1 - F_{cs11}) \cdot v_{csc}$$

em que:

val_{cc11i} = volume do fluxo de caldo destinado ao álcool com a adoção da prioridade 1, opção 1 e caldo primário insuficiente para abastecer o processo [m³/h].

A massa de ART destinada ao processo do álcool é igual:

$$mal_{ARTcc11i} = m_{ARTpts} \cdot \{(1 - F_{cs11}) \cdot [(E_{et} - E_{ept}) \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iest}/100] - P_{icc}/100 - P_t/100\}$$

em que:

$mal_{ARTcc11i}$ = fluxo de massa ART destinado ao álcool com adoção da prioridade 1, opção 1 e caldo primário insuficiente para abastecer o processo [t/h].

A.2 – Opção 2: Caldo misto para a fabricação do açúcar

Está implícito, nesta opção, que o caldo misto é suficiente para abastecer o processo de açúcar com folga, sendo o restante destinado ao processo do álcool. Portanto, tem-se:

$$va_{cc12} = c_a$$

em que:

va_{cca12} = vol. do fluxo de caldo clarificado ao açúcar para a prioridade 1 e opção 2 [m³/h].

O fluxo de massa de ART destinado ao açúcar é dado por:

$$\begin{aligned} ma_{ARTcc12} = & Fa_{cc12} \cdot m_{ARTpts} \cdot \{ [E_{ept} \cdot \\ & \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iept}/100] + \\ & + [(E_{et} - E_{ept}) \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - \\ & - P_{iest}/100] - P_{icc}/100 - P_t/100 \} \end{aligned}$$

em que:

$ma_{ARTcc12}$ = fluxo de massa ART destinado ao açúcar para prioridade 1 e opção 2 [t/h];

Fa_{cc12} = fração do vol. do fluxo de caldo destinado ao açúcar para prioridade 1 e opção 2.

O volume do fluxo de caldo destinado ao processo do álcool é dado por:

$$val_{cc12} = (1 - Fa_{cc12}) \cdot (v_{cpc} + v_{csc})$$

em que:

val_{cc12} = vol. do fluxo destinado ao álcool para a prioridade 1 e opção 2 [m³/h].

O fluxo de massa de ART destinado ao processo do álcool é igual:

$$\begin{aligned} mal_{ARTcc12} = & (1 - Fa_{cc12}) \cdot m_{ARTpts} \cdot \{ [E_{ept} \cdot \\ & \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iept}/100] + \\ & + [(E_{et} - E_{ept}) \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - \\ & - P_{iest}/100] - P_{icc}/100 - P_t/100 \} \end{aligned}$$

em que:

$mal_{ARTcc12}$ = fluxo de massa ART destinado ao álcool para a prioridade 1 e opção 2.

B – Prioridade 2: Fabricação de álcool (destinar o caldo prioritariamente para o processo de fabricação de álcool e o restante, se houver, para o processo de açúcar)

A estratégia de priorizar o caldo para a fabricação de álcool, comumente nas indústrias, carrega a opção de escolha de caldo misto. O volume do fluxo é igual à menor capacidade máxima de processamento.

$$val_{cc2} = c_{al}$$

em que:

val_{cc2} = vol. do fluxo de caldo clarificado destinado ao álcool para a prioridade 2 [t/h];

c_{al} = menor capac. máxima de processamento ajustada do processo do álcool [m³/h].

O fluxo de massa de ART do caldo destinado à fabricação de álcool é dado por:

$$\begin{aligned} mal_{ARTcc2} = & Fal_{cc2} \cdot m_{ARTpts} \cdot \{ [E_{ept} \cdot \\ & \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iept}/100] + \\ & + [(E_{et} - E_{ept}) \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - \\ & - P_{iest}/100] - P_{icc}/100 - P_t/100 \} \end{aligned}$$

em que:

mal_{ARTcc2} = fluxo de massa ART destinado ao álcool para a prioridade 2 [t/h];

Fal_{cc2} = fração do volume do fluxo de caldo destinado ao álcool para prioridade 2.

O volume do fluxo de caldo destinado ao processo do açúcar é dado por:

$$va_{cc2} = (1 - Fal_{cc2}) \cdot (v_{cpc} + v_{csc})$$

em que:

va_{cc2} = volume do fluxo de caldo destinado ao açúcar para a adoção da prioridade 2 [m³/h].

O fluxo de massa de ART destinado ao processo do açúcar é igual:

$$\begin{aligned} ma_{ARTcc2} = & (1 - Fal_{cc2}) \cdot m_{ARTpts} \cdot \{ [E_{ept} \cdot \\ & \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iept}/100] + \\ & + [(E_{et} - E_{ept}) \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - \\ & - P_{iest}/100] - P_{icc}/100 - P_t/100 \} \end{aligned}$$

em que:

ma_{ARTcc2} = fluxo de massa ART destinada ao açúcar com adoção da prioridade 2.

Os cálculos daqui em diante são análogos aos apresentados até o momento e, por questão de conveniência, não serão mostrados.

Evaporação

Na fase de evaporação do caldo observa-se *perda indeterminada* associada, principalmente, à decomposição da sacarose devido a temperaturas elevadas. As perdas que podem ser quantificadas estão ligadas ao multijato, que é um equipamento utilizado para promover a formação de autovácuo nos evaporadores, formação esta necessária para realizar a evaporação em temperaturas mais baixas. Esses equipamentos utilizam injeção de água para formação do autovácuo, e ela acaba por arrastar alguma quantidade de açúcar nesse processo.

O caldo, nesta fase, sofre a maior variação de massa de todo o processo industrial. Ele parte da condição de clarificado para a condição de xarope, nome usado para o caldo concentrado na saída da evaporação, como pode ser visualizado na Figura 7.

Cozimento, cristalização, centrifugação e secagem

A perda de açúcar envolvida nesta fase é semelhante àquelas que ocorrem na evaporação, ou seja: *perdas indeterminadas* por decomposição da sacarose devido a temperaturas elevadas e as perdas por arraste no multijato (equipamento semelhante e com a mesma finalidade do multijato da evaporação), que, por outro lado, podem ser quantificadas.

Nesta fase, porém, outra perda significativa e que normalmente é incluída nas indeterminadas, devido à sua difícil obtenção, é a perda que ocorre na operação de secagem.

O açúcar sai do processo com certa umidade e, antes da armazenagem, é necessária a secagem, que se processa por fluxo de ar seco e quente sobre ele. A perda se dá pelo arraste do açúcar pelo fluxo de ar. A minimização dessa perda é realizada pela “lavagem” do ar que retorna ao processo. A construção da fronteira imaginária para a realização do equilíbrio de massa é mostrada pela Figura 8.

Balanço de ART e perdas no processo de fabricação do álcool

O balanço de ART para o processo do álcool, neste trabalho, parte da fase de fermentação, uma vez que a recepção, extração e, com algumas considerações, também a clarificação do caldo são fases realizadas para obtenção do caldo para ambos os processos e já foram demonstradas anteriormente.

Preparação do mosto, fermentação e centrifugação

As perdas provenientes do processo de preparo do mosto, fermentação e centrifugação estão associadas a questões químicas, mecânicas e microbiológicas, assim como nas demais partes de uma usina, porém o efeito desta última é muito significativo nesta fase, pelo fato de a fermentação ser um processo biológico.

Como perda química pode-se destacar a morte de levedura por variações no pH do tratamento químico. A perda, neste caso, deve-se à necessidade de reprodução da levedura para atingir a quantidade normal novamente, com conseqüente consumo de energia (ART).

Por perdas mecânicas observam-se aquelas ligadas à eficiência da torre de “lavagem” do CO₂ (produto da fermentação alcoólica), em separar o álcool, eficiência da centrifugação na separação do fermento dos demais componentes, perdas em lavagens de dornas e possíveis vazamentos em equipamentos em geral.

As perdas microbiológicas devem-se a variações na viabilidade da própria levedura, fugindo ao equilíbrio entre produção de álcool e consumo “biológico” de energia e a presença de outros microrganismos que interagem e afetam negativamente o processo de fermentação.

De todas essas perdas, a única que pode ser quantificada é a perda na fermentação, ficando as demais na categoria indeterminada.

Neste ponto do processo é necessário verificar se os equipamentos desta fase e da fase de destilação têm capacidade para processar o total de mosto/vinho (ver Figura 1). Caso não tenha, há a opção de limitar a quantidade de mel proveniente do açúcar a ser adicionado ao caldo, armazenando o restante em tanques para ser processado numa eventual parada da moagem.

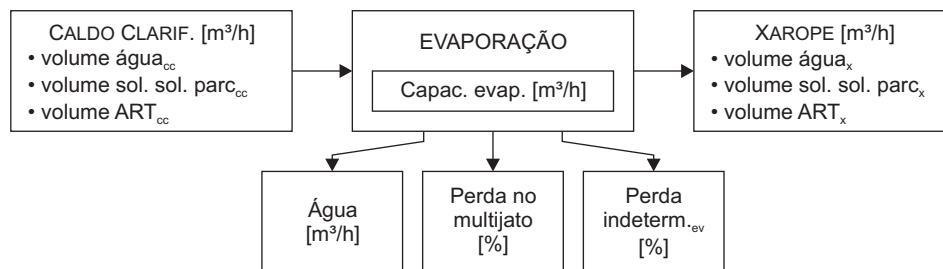


Figura 7 Balanço de ART na fase de evaporação.

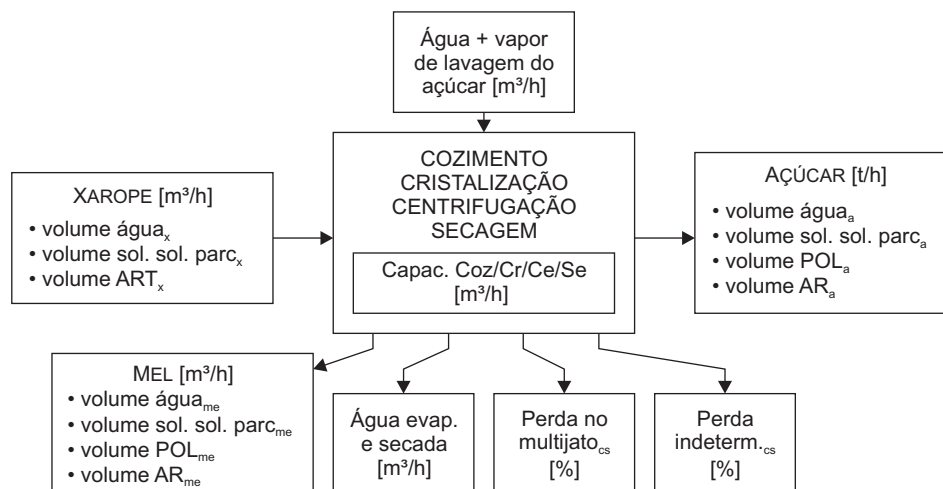


Figura 8 Balanço de ART nas fases de cozimento, cristalização, centrif. e secagem.

Se a armazenagem do mel não for suficiente para equilibrar a capacidade de processamento dos equipamentos ou, ainda, não for de interesse, então é necessário diminuir a moagem de cana.

Essa ação de armazenar, ou não, está ligada ao fator regulador de mel-frm. Fator regulador de mel maior que 1 significa que há folga na capacidade dos equipamentos; e menor que 1 significa que é necessário armazenar mel. Esse fator é mostrado no simulador.

Uma fronteira imaginária ao redor das fases de preparo do mosto, fermentação e centrifugação é mostrada pela Figura 9.

Destilação

As perdas envolvidas na destilação são, praticamente, todas determinadas. Elas ocorrem pela presença de resíduos de álcool na vinhaça e flegmaça, resíduos estes não separados dos demais componentes durante o processo de destilação, por “desvios” na operação dos equipamentos. A Figura 10 mostra o equilíbrio de massa desta fase.

Os produtos da destilaria são o álcool anidro e hidratado. O álcool anidro é produzido na coluna C da destilaria, a partir do álcool hidratado. Portanto, o volume de álcool anidro produzido tem valor que varia de “zero” até um valor máximo, que pode ser a capacidade máxima de produção da coluna C ou o volume total de álcool hidratado.

A quantidade produzida está limitada a esses fatores e, dentro deles, o simulador permite a escolha da quantidade desejável através do fator de conversão de álcool hidratado em anidro – F_{ha} . A escolha das quantidades está ligada,

na prática, a fatores operacionais ou econômicos, tendo um campo na planilha para o seu lançamento.

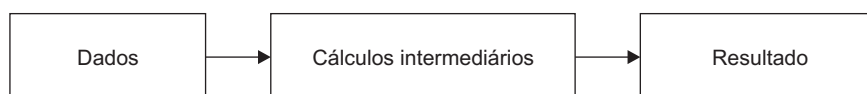
Resultados e Discussões

A quantidade de cada produto do processo de fabricação é determinada por uma equação final, de acordo com a prioridade e a opção escolhidas. Essa equação foi sendo construída à medida que o equilíbrio de massa foi se processando e também carregando as perdas indeterminadas de cada etapa, da qual se conhece somente o valor global. Disso levanta-se a seguinte questão: *qual quantidade desta perda está ligada ao processo do açúcar e qual está ligada ao processo do álcool?*

Enquanto ela for indeterminada, obviamente, nunca se saberá e, portanto, este simulador sugere a adoção do seguinte critério: *atribuir o total das perdas indeterminadas ao processo do açúcar*. Essa adoção baseia-se no fato de saber, por experiência de processos industriais, que a perda indeterminada no processo do álcool é muito pequena.

Definida essa questão, o simulador passa a ser a organização e aplicação das equações desenvolvidas a partir do equilíbrio de massa, mostrado pelo volume de controle de cada fase em uma planilha. A organização adotada aqui seguiu o critério do fluxograma a seguir.

O primeiro bloco é composto pela Tabela 2, que traz os dados históricos, ou estimados, das características da matéria-prima, eficiências, capacidades e os volumes e massas dos compostos químicos utilizados no processo. Traz, também, os campos para serem preenchidos com o critério e opção de produção e o tipo de açúcar desejado.



Note que na Tabela 2 foram preenchidos todos os “campos de critérios e opções”, para que, ao final dos cálculos, naquelas condições de mercado tenha-se a opção de maior lucro.

Pela Tabela 3 são mostrados os cálculos chamados “primários e intermediários”, que trazem resultados parciais a serem utilizados nos cálculos finais, e foram assim destacados, pois são informações de grande interesse para monitoramento das fases intermediárias da produção.

Por fim, na Tabela 4 são mostrados os resultados de produção e econômicos, que são os principais objetivos do simulador.

Validação do simulador

Para a validação do simulador partiu-se da produção real da empresa Virgolino de Oliveira S/A – Açúcar e Álcool, tomando-se um período de uma semana de atividade. A comparação entre um cenário simulado com dados reais e uma produção real é mostrada a seguir.

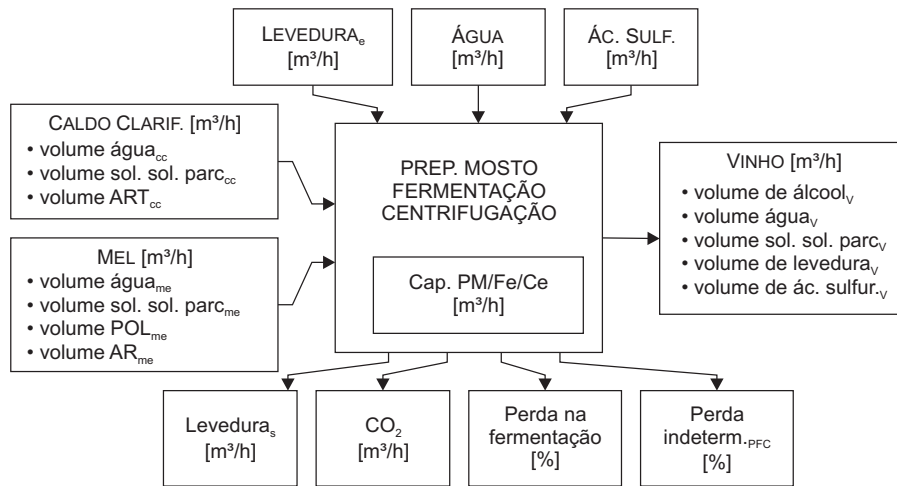


Figura 9 Balanço de ART nas fases de preparo do mosto, fermentação e centrifugação.

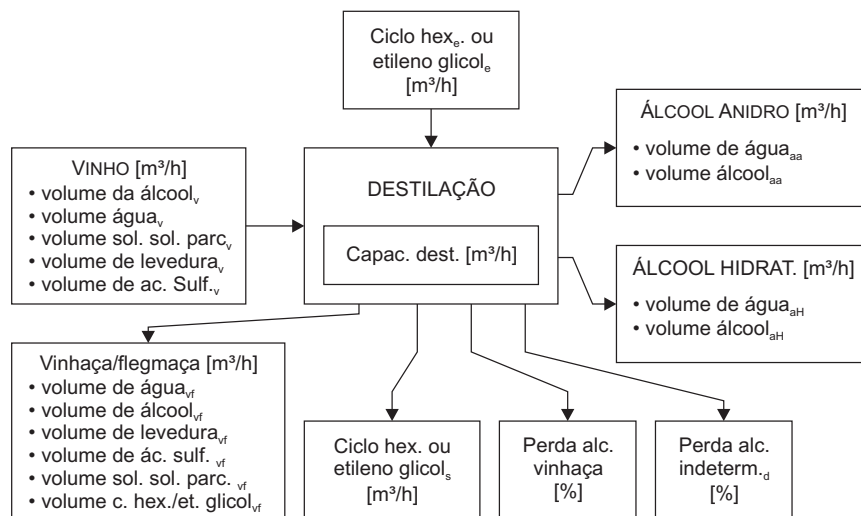


Figura 10 Balanço de ART na fase de destilação de álcool.

Tabela 1 Comparação entre resultados de produção simulada e real.

Produto	Quant. simulada	Quant. real	[%]
Açúcar [t]	6163,503	5959,000	3,4
Álc. hid. [m ³]	2370,180	2308,571	2,7
Álc. anid. [m ³]	4420,879	4265,752	3,6

Tabela 2 Dados históricos ou estimados do processo.

Dados iniciais	
Cana total do período (t)	111080
Número de dias do período (dias)	7

Dados cana	Histórico
Massa – m_{cpts} (t/h)	661,19
Art – Art_{cpts} (kg/t cana)	162,962
Fibra – $\text{fibra}_{\text{cpts}}$ (%)	12,86
Impurezas minerais – Im_{cpts} (%)	1,1893

Dados extração	Histórico
Efic. extração primeiro terno – E_{ept}	0,68411
Efic. extração total – E_{et}	0,97703
Densidade caldo primário – ρ_{cp} (t/m ³)	1,06
Volume água embebição – v_{ac} (m ³ /h)	180
Cap. Nom. moagem – C_{nm} (t/h)	720

Dados clarificação do caldo	Histórico
Umidade da torta – u_t (%)	70
Torta filtro total período (t) (se não dispuser deixar em branco e preencher o seguinte)	3073
Padrão massa torta – m_p (kg/t cana) (se preenchido o anterior, deixar este em branco)	28
Fluxo de massa torta – m_t (t/h)	18,29
Massa de cal – m_{cal} (kg/t cana)	0,215
Art do caldo clarificado – ART_{cc}	155,1
Densidade do caldo clarif. – ρ_{cc} (t/m ³)	1,06
Vol. água embebição lodo – v_{ael} (m ³ /h)	30
Fator red. vol. caldo decant. – f_d	1,2
Cap. nom. clarif. – C_{nc} (m ³ caldo extraído/h)	900

Dados fabricação de açúcar	Histórico
Densidade do xarope – ρ_x (t/m ³)	1,35
Densidade da massa cozida – ρ_{mc} (t/m ³)	1,45
Cap. nom. evapor. – c_n (m ³ caldo clarif/h)	550
Cap. nom. cozimento – C_{nc} (m ³ xarope/h)	100
Cap. nom. centrifug. – C_{cc} (m ³ massa/h)	108
Cap. nom. secador – C_{sc} (t açúcar/h)	50

Escolha do critério de produção colocar “X” (maiusculo) na(s) opção(ões) desejada(s)		
Prioridade 1 Destinar caldo prioritario processo do açúcar	Opção 1 Caldo prim.	X
	Opção 2 Caldo misto	X
Prioridade 2 Destinar caldo prioritario processo do álcool	Opção Caldo misto	X

Dados destilaria	Histórico
Densidade do vinho – r_v (t/m ³)	1,06
Brix do mosto desejado – Brix_{mid}	22
Massa de ácido sulfúrico – m_{as} (t/h)	0,352
Teor alcoólico do álc. hidrat. – T_{ah} (GL)	92,7
Teor alcoólico do álc. anidro – T_{aa} (GL)	99,3
Fator conversão álc. hidrat. anidro – F_{ha}	0,65
Cap. nom. dest. hidrat. – C_{ndh} (m ³ álc. hid./h)	1100
Cap. nom. dest. anidro – C_{nda} (m ³ álc. hid./h)	600
Cap. nom. ferment. – C_{nf} (m ³ mosto/h)	380

Dados da perda de ART	Histórico
Perda lavagem – P_L (%)	2,257
Perda torta – P_t (%)	0,69
Perda multijato evapor. – P_{mje} (%)	0,008
Perda multijato cozedor – P_{mjc} (%)	0,004
Perda fermentação – P_f (%)	7,589
Perda destilação – P_d (%)	0,129
Perda indetermin. Açúcar – P_i (%)	0,714
Perda indetermin. Álcool – P_i (%)	0

Dados econômicos	Real
Custo produção açúcar tipo 1 – (R\$/t)	305
Custo produção açúcar tipo 2 – (R\$/t)	
Custo produção açúcar tipo 3 – (R\$/t)	
Custo produção açúcar tipo 4 – (R\$/t)	
Custo produção açúcar tipo VHP – (R\$/t)	
Custo produção açúcar tipo VVHP – (R\$/t)	
Custo produção álcool hidrat. – (R\$/L)	0,48
Custo produção álcool anidro – (R\$/L)	0,45
Preço mercado açúcar tipo 1 – (R\$/t)	517
Preço mercado açúcar tipo 2 – (R\$/t)	
Preço mercado açúcar tipo 3 – (R\$/t)	
Preço mercado açúcar tipo 4 – (R\$/t)	
Preço mercado açúcar tipo VHP – (R\$/t)	
Preço mercado açúcar tipo VVHP – (R\$/t)	
Preço mercado álcool hidrat. – (R\$/L)	0,44
Preço mercado álcool anidro – (R\$/L)	0,4

Dados vinculados à escolha do critério de produção	Prioridade 1		Prioridade 2
	Opção 1	Opção 2	
Brix do xarope – Brix_x	56,31	56,31	56,31
Brix do caldo clarificado – Brix_{cc}	16,1	16,1	16,1
Brix da massa cozida – Brix_{mc}	89,61	89,61	89,61
ART do mel final p ART_m (kg/t de mel)	612,94	612,94	612,94
Brix do mel final – Brix_m	82,58	81,58	81,58
Pureza do caldo clarificado – P_{cc}	89,35	89,35	89,35
Pureza do mel final – P_m	68,491	68,491	68,491

Tabela 3 Cálculos parciais.

Cálculos primários		Cálculos intermediários				
Massa de ART PCTS – $m_{ARTpcts}$ (t/h)	107,749	Prioridade 1	Opção 1	Caldo prim. sufic.	Fração caldo primário – F_{cp11}	1,410
Volume de água torta – v_{at} (m ³ /h)	12,804				Vol. caldo destinado álcool – val_{cc11s}	
Volume água leite de cal – v_{alc} (m ³ /h)	0,498				Vol. caldo destinado açúcar – va_{cc11s}	
Volume caldo primário – v_{cpc} (m ³ /h)	366,772				Massa de mel – m_m (t/h)	
Volume caldo secundário – v_{csc} (m ³ /h)	337,043				Massa de ART do mel – m_{ARTm} (t/h)	
Recuperação – r	0,744				Fator regulador de mel – frm_{11s}	
Capac. clarificação ajustada – Ca_{cc} (m ³ /h)	900				Vol. álcool hid. parcial – v_{ah11s} (m ³ /h)	
Capac. evaporação ajustada – Ca_e (m ³ /h)	660				Fração caldo secundário – F_{cs11}	0,447
Capac. cozimento ajustada – Ca_{co} (m ³ /h)	535		Vol. caldo destinado álcool – val_{cc11i}	186,509		
Capac. centrifug. ajustada – Ca_{cc} (m ³ /h)	987		Vol. caldo destinado açúcar – va_{cc11i}	535,000		
Capac. secagem ajustada – Ca_{se} (m ³ /h)	641		Massa de mel – m_m (t/h)	37,355		
Menor cap. máxima fab. açúcar – C_a (m ³ /h)	535		Massa de ART do mel – m_{ARTm} (t/h)	22,896		
Menor cap. máxima fab. álcool – C_{al} (m ³ /h)	350		Fator regulador do mel – frm_{11i}	14,927		
			Vol. álcool hid. parcial – v_{ah11i} (m ³ /h)	21,351		
		Opção 2	Caldo misto	Fração caldo misto – Fa_{cc12}	0,742	
				Vol. caldo destinado álcool – val_{cc12}	181,935	
				Vol. caldo destinado açúcar – va_{cc12}	535,000	
				Massa de mel – m_m (t/h)	37,355	
				Massa de ART do mel – m_{ARTm} (t/h)	22,896	
				Fator regulador do mel – frm_{12}	15,124	
				Vol. álcool hid. parcial – v_{ah12} (m ³ /h)	32,690	
		Prioridade 2	Caldo misto	Fração caldo misto – Fa_{cc2}	0,485	
				Vol. caldo destinado açúcar – va_{cc2}	362,398	
				Vol. caldo destinado álcool – val_{cc2}	350,000	
				Massa de mel – m_m (t/h)	25,304	
				Massa de ART do mel – m_{ARTm} (t/h)	15,510	
				Fator regulador do mel – frm_2	10,549	
				Vol. álcool hid. parcial – v_{ah2} (m ³ /h)	42,297	
Comentários						
Na prioridade 1/opção 1, o caldo primário pode não ser suficiente para alimentar o processo do açúcar. Neste caso é necessário adicionar caldo secundário para completar o processo. A planilha executa os cálculos desses volumes e, automaticamente, separa as duas condições: suficiência e insuficiência de caldo primário, mostrando neste último caso o quanto de caldo secundário foi utilizado do total pelo F_{cs11} (linha 9).						

Conclusão

A cana é uma cultura anual que tem sua época de maior produção vinculada à sua maturação, e esta, a um período determinado do ano. Dentro desse cenário está a quantidade de cana plantada a ser moída, a capacidade de processamento do parque industrial para cada tipo de produto e o valor de mercado desses mesmos produtos. A escolha de determinada combinação de produção, em relação à quantidade e tipo de produto, determina a capacidade de processamento da cana e, com isso, o início e duração da

safra, o suprimento de recursos humanos e materiais e toda a estratégia financeira e econômica do empreendimento.

Essas questões estão dentre as de maior importância ao empreendimento, e uma ferramenta como esta se mostra extremamente útil para a tomada de decisão. Uma vez planejada a safra e estando esta em andamento, mudanças pontuais de rumo por qualquer motivo operacional ou econômico, que necessite de novas decisões sem perder de vista os aspectos globais, encontram também nela um apoio importante.

Tabela 4 Resultados de produção e econômico.

Critério de produção			Cálculos de produção				Cálculos econômicos	
			Produto	Horário Açúcar (t/h) Álcool (L/h)	Período Açúcar (t) Álcool (L)	Período Açúcar (saco) Álcool (L)		
Prioridade 1	Opção 1	Caldo primário sufic.	Massa açúcar – m_{a11s}				Faturam. (R\$)	
			Volume álc. hidrat. – v_{ah11s}				Despesas (R\$)	
			Volume álc. anidro – v_{aa11s}				Lucro/prej. (R\$)	
	Opção 1	Caldo primário insufic.	Massa açúcar – m_{a11i}	61,304	10299,084	20592	Faturam. (R\$)	5326045,54
			Volume álc. hidrat. – v_{ah11i}	7,122	1196,449	1196,449	Despesas (R\$)	3142799,16
			Volume álc. anidro – v_{aa11i}	13,283	2231,627	2231,627	Lucro/prej. (R\$)	2183246,38
	Opção 2	Caldo misto	Massa açúcar – m_{a12}	52,104	8753,503	175070	Faturam. (R\$)	4527733,96
			Volume álc. hidrat. – v_{ah12}	10,904	1831,864	1831,864	Despesas (R\$)	2672235,37
			Volume álc. anidro – v_{aa12}	20,338	3416,808	3416,808	Lucro/prej. (R\$)	1855498,59
Prioridade 2	Caldo misto	Massa açúcar – m_{a2}	36,688	6163,503	123270	Faturam. (R\$)	3189342,40	
		Volume álc. hidrat. – v_{ah2}	14,108	2370,180	2370,180	Despesas (R\$)	1882995,57	
		Volume álc. anidro – v_{aa2}	26,315	4420,879	4420,879	Lucro/prej. (R\$)	1306346,83	
Critério de produção								
Prioridade 1/Opção 1 = Caldo primário destinado prioritariamente para o açúcar Prioridade 1/Opção 2 = Caldo misto destinado prioritariamente para o açúcar Prioridade 2/Opção única = Caldo misto destinado prioritariamente para o álcool								
Comentários								
Na prioridade 1/opção 1, o caldo primário pode não ser suficiente para alimentar o processo do açúcar. Neste caso é necessário adicionar caldo secundário para completar o processo. A planilha executa os cálculos desses volumes e, automaticamente, separa as duas condições: suficiência e insuficiência de caldo primário.								

Outro ponto colocado dentro dos objetivos é a simplicidade e facilidade de utilização. A opção de construção de um simulador baseado em uma ferramenta computacional simples facilita seu manuseio por qualquer profissional do setor.

Por outro lado, o número de variáveis para a sua operação é relativamente alto. Porém, são variáveis rotineira e sistematicamente medidas e acompanhadas por uma empresa qualquer, que se proponha a ter um processo industrial eficaz e constantemente monitorado, resultando em uma produção maximizada e econômica. Nesses aspectos, os objetivos foram cumpridos.

Referências Bibliográficas

- BAYMA, C. *Tecnologia do açúcar*: da matéria-prima à evaporação. Rio de Janeiro, 1974.
- DELGADO, A. A.; CEZAR, M. A. A. *Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana*. Departamento de Tecnologia Rural da Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz – USP, 1977. v. 2.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1976.