

Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Química

Thaís Lavez Cardeal Naves

**Aplicação de conceitos de *smart manufacturing* com objetivo de reduzir o consumo de vapor em evaporadores na indústria alimentícia.**

Uberlândia, MG  
2022

Thaís Lavez Cardeal Naves

Aplicação de conceitos de *smart manufacturing* com objetivo de reduzir o consumo de vapor em evaporadores na indústria alimentícia.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro habilitação Engenharia Química

Área de concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Rubens Gedraite

Uberlândia

2022

Thaís Lavez Cardeal Naves

Aplicação de conceitos de *smart manufacturing* com objetivo de reduzir o consumo de vapor em evaporadores na indústria alimentícia.

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro habilitação Engenharia Química apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia

Área de concentração: Engenharia Química

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rubens Gedraite

Orientador

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Prof. Dr. Sérgio Mauro da Silva Neiro

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Prof. Dr. Rodrigo Sislian

Instituto Federal de São Paulo / Campus Guarulhos

Uberlândia, 23 de maio de 2022

## RESUMO

Neste trabalho é estudado o modelamento matemático aproximado do consumo de vapor em um evaporador através da aplicação de ferramentas e conceitos de manufatura inteligente (*smart manufacturing*). O modelo foi desenvolvido com base na análise do comportamento histórico das variáveis de processo escolhidas, considerando o período de um ano, de modo a permitir a monitoração da eficiência do equipamento, contribuindo desta maneira para reduzir o consumo de vapor de água. Após a etapa de identificação dos parâmetros do modelo, foi realizada a implementação do mesmo no sistema de controle existente na unidade industrial e desenvolvidas as telas de visualização e de troubleshooting do evaporador.

Palavras-chave: vapor, eficiência do evaporador, manufatura inteligente, modelamento matemático.

## *ABSTRACT*

In this work, the approximate mathematical modeling of steam consumption in an evaporator is studied through the application of smart manufacturing tools and concepts. The model was developed based on the analysis of the historical behavior of the chosen process variables, considering the period of one year, in order to allow the monitoring of the equipment's efficiency, thus contributing to reduce the consumption of water vapor. After identifying the model parameters, it was implemented in the existing control system at the industrial unit and the evaporator visualization and troubleshooting screens were developed.

Keywords: steam, evaporator efficiency, smart manufacturing, mathematical modeling.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

**Figura 2.1** – Composição do grão de milho.

**Figura 2.2** – Diagrama de blocos do processo.

**Figura 2.3** - Representação de um evaporador de simples efeito.

**Figura 2.4** - Representação de um evaporador de múltiplos efeitos.

**Figura 2.5** – evaporador e seu volume de controle.

**Figura 2.6** – Componentes do “PI system”.

**Figura 3.1** – Tela do assistente de acesso ao módulo de análise preditiva.

**Figura 3.2** – Tela de seleção para o “*Best Subsets Regression*”.

**Figura 3.3** – Tela de apresentação dos resultados.

**Figura 3.4** – Tela de apresentação do gráfico de Pareto.

**Figura 4.1** – Tela gráfica para acompanhamento da variável Y.

**Figura 4.2** – Tela gráfica do *Troubleshooting Guide*.

**Figura 4.3** – Tela de status de funcionamento.

# LISTA DE TABELAS

**Tabela 3.1** – Amostra de dados no PI Vision.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>33</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>34</b>



# 1 INTRODUÇÃO

A automação industrial ganhou destaque por volta da segunda metade do século XVIII ao início do século XX, durante as revoluções industriais. Desde então, a utilização da automação industrial com o objetivo de garantir a produtividade, qualidade e segurança em um processo se fez essencial.

Uma contribuição importante dos sistemas de Automação Industrial é a conexão entre o sistema de supervisão e controle e os sistemas corporativos de administração das empresas a partir do uso de softwares de visualização e armazenamento de dados. Esse vínculo permite o acompanhamento instantâneo de dados da operação diária dos processos, e contribui para uma maior agilidade do processo decisório e maior confiabilidade dos dados que suportam as decisões dentro da empresa **(SEBRAE, 2018)**.

Hoje em dia o mercado de automação oferece diversas opções de softwares para monitoramento e controle de processos industriais. Esses *softwares* simplificam a compreensão e controle de dados de processos importantes, e por consequência geram diversos benefícios, como maior produtividade, maior eficiência geral do equipamento, redução de custos, melhor gerenciamento de qualidade, entre outros **(WOLFF, 2006)**.

Os benefícios da aplicação do conceito de *smart manufacturing* a partir de *softwares* de automação vai muito além de ganhos de produtividade no chão de fábrica. Essa nova revolução industrial pode promover uma maior flexibilidade das linhas de produção, o aumento da eficiência no uso de recursos (por exemplo, energia e vapor), o encurtamento dos prazos de lançamento de novos produtos no mercado, entre outros **(WANG et al, 2021)**.

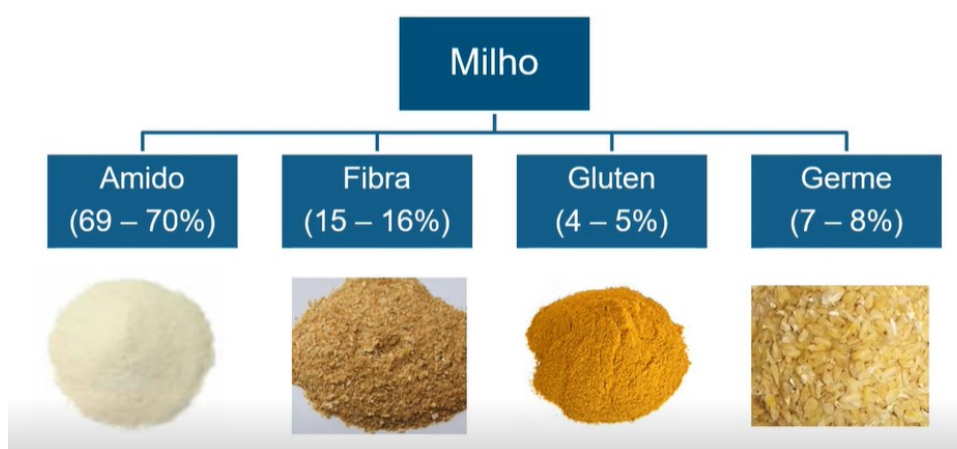
Nesse trabalho foi empregada a ferramenta "PI System", desenvolvida pela empresa OSIsoft, com objetivo de analisar informações de processo e desenvolver um modelo para a redução do consumo de vapor em um evaporador.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Considerações sobre o processo em estudo

O processo estudado trata-se do processo de produção de xaropes de glucose a partir do amido de milho. O grão de milho é composto por aproximadamente 70% de amido, 16% de fibra, 5% de glúten e 8% de germe, como ilustrado na **Fig. 2.1**.

**Figura 2.1** – Composição do grão de milho



Fonte: autoria própria

O processo de conversão é controlado a partir do teor de dextrose equivalente (*DE*), expressa em porcentagem. O *DE* indica o grau de hidrólise ou quebra da cadeia de amido.

Após o recebimento e classificação do milho, este é encaminhado para moagem. Essa etapa é composta por uma série de operações que tem como objetivo a separação dos quatro elementos constituintes do milho e o encaminhamento de cada um deles para seu respectivo processamento futuro. O processo em questão emprega como matéria prima a suspensão de amido, também conhecida como *slurry*, que é uma solução de amido e água com *DE* aproximadamente igual a 0. O *slurry* é encaminhado para os tanques de acidificação onde é dosado HCl com objetivo de obter um pH aproximadamente igual a 2,10. Em seguida o *slurry* é transferido ao equipamento conhecido como *converter*, o qual é responsável por elevar a

temperatura até aproximadamente 135°C e depois, feito circular pelos *loops* de retenção com objetivo específico de aumentar o tempo de residência para atingir a conversão desejada de 38 *DE*. Em seguida, inicia-se a etapa de sacarificação, onde o produto é encaminhado para os tanques de sacarificação nos quais é feita a dosagem de enzimas e tem início a conversão enzimática. Ao fim da conversão o produto atinge aproximadamente 45 *DE*. Em seguida, passa pela etapa de filtração e é encaminhado para o evaporador. O diagrama de blocos apresentado na **Fig. 2.2** sintetiza as principais etapas do processo em estudo.

**Figura 2.2** – Diagrama de blocos do processo



Fonte: autoria própria

## 2.2. Considerações sobre a operação unitária evaporação

A evaporação ou concentração é uma das operações unitárias básicas na produção de produtos alimentícios líquidos. Ela corresponde à concentração de uma solução através da remoção do solvente pela vaporização, na sua temperatura de ebulição. Portanto, a evaporação ocorre quando a energia suficiente é fornecida a uma solução, permitindo que as moléculas do solvente vençam as forças de atração intermolecular (**MEHRA, 1986**).

Quando essa remoção é conduzida de tal forma que a umidade final esteja situada entre 0 e 15 – 20% a técnica empregada recebe o nome de desidratação. Nesse caso, a temperatura em que ocorre a vaporização não é a temperatura de ebulição da fase líquida. Em outros casos, apenas parte do solvente é removida obtendo-se soluções concentradas ou produtos semissólidos com teores de umidade superiores a 20%, assim, se a temperatura de vaporização é a temperatura de ebulição do solvente o processo envolvido é denominado de concentração ou evaporação (**SINGH; HELMAN, 1991**).

Geralmente o produto desejado é a solução concentrada, mas ocasionalmente o produto desejado pode ser o solvente evaporado. Como por exemplo, pode-se citar a dessalinização da água do mar. A esse processo é dado o nome de destilação, porém ele de fato é um processo de evaporação, já que o solvente não é fracionado como na destilação clássica (**FOUST, 1982**).

Tendo em vista essas restrições pode-se definir concentração ou evaporação como sendo a remoção, pelo mecanismo de vaporização térmica (na temperatura de ebulição) de parte de solvente de uma solução ou dispersão de solutos essencialmente voláteis. A evaporação difere da cristalização e da secagem pelo fato de que o produto final se caracteriza como sendo uma dispersão ou uma solução concentrada (**HELMAN, 1975**).

Segundo **Brennan (1976)**, a concentração apresenta três principais aplicações na indústria alimentícia:

- Pré-concentração de uma solução antes de outros processamentos, como por exemplo: *(i)*- antes da operação de secagem – geralmente conduzida por atomização – e *(ii)*- antes da operação de cristalização etc.
- Redução do volume de líquidos para diminuir os custos de armazenamento, embalagem e transporte.
- Reduzir a atividade de água pelo aumento da concentração dos sólidos auxiliando, assim a conservação dos alimentos.

Entretanto essas aplicações só se tornam válidas se o produto alimentício não perder os seus componentes nutricionais durante essa etapa do seu processamento. Para isso, a tecnologia empregada lança mão de vários artifícios.

Durante a evaporação ocorrem diversos processos cinéticos. Em primeiro lugar, ocorre a transferência de calor no meio de aquecimento para a solução que está sendo concentrada. Essa transferência ocorre em três etapas distintas. Inicialmente, vapor saturado condensa sobre a superfície de transferência de calor. O calor de condensação é então transferido, por condução, através dessa superfície. Finalmente, o calor é transferido por

convecção da superfície para o seio da solução que está sendo concentrada. Em segundo lugar, ocorre uma transferência de calor e de massa da fase líquida para vapor (**JOSLYN; HEID, 1964**).

Um exemplo típico de aplicação da operação de concentração na indústria de alimentos é a produção de extrato de tomate. O teor de sólidos no produto final – 9% no caso de purê de tomate; 18% no caso de extrato de tomate simples concentrado; 25% no caso de extrato de tomate duplo concentrado; e 33% no suco de tomate, que possui um teor de sólidos variável de 5% a 6%, por meio da evaporação.

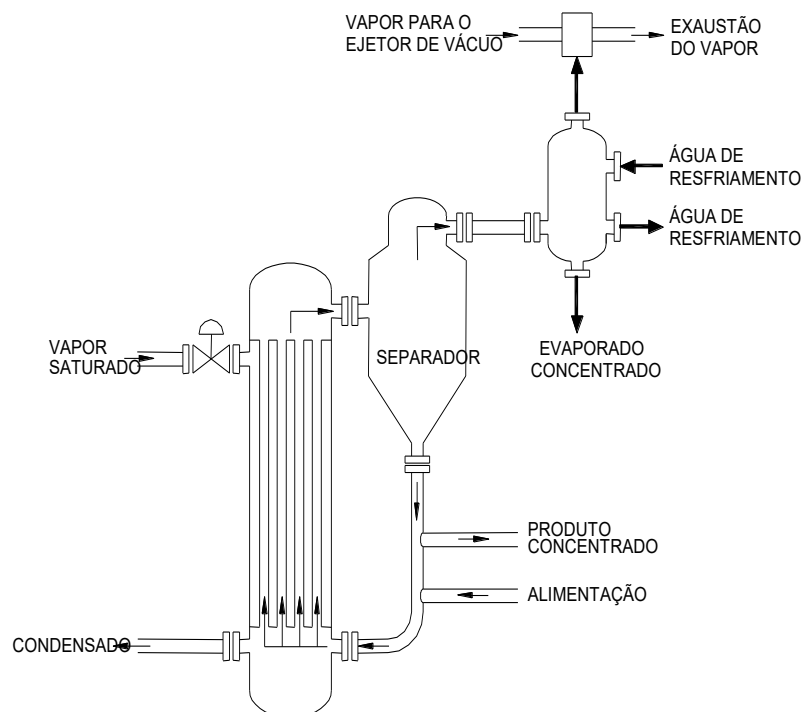
Caracteriza-se um evaporador industrial como sendo normalmente constituído por (**FOUST, 1982**):

- Um **trocador de calor** para fornecer o calor necessário à vaporização da solução. Na indústria alimentícia, vapor de água saturado é geralmente usado como o meio de aquecimento.
- Um **condensador** para realizar a condensação da água evaporada e sua remoção do sistema. Esse trocador de calor pode ser omitido se o sistema opera à pressão atmosférica.
- Um **sistema de manutenção de vácuo** que além de promover a remoção do solvente vaporizado, auxilia na remoção dos que não condensaram. Na indústria alimentícia este sistema se torna de grande utilidade, pois o risco de danos térmicos ao alimento que está sendo concentrado frequentemente ocorre, principalmente, se a evaporação estiver sendo conduzida à pressão atmosférica. O vácuo pode ser obtido de várias maneiras: ejetores, bombas de vácuo, torres barométricas, ou por meio da combinação de dois ou mais desses equipamentos.

No interior do evaporador o produto é mantido sob vácuo para reduzir sua temperatura de ebulição e assim reduzir os danos causados pela exposição à temperatura elevada. O vapor do solvente produzido no evaporador é encaminhado para um condensador onde é condensado e então descarregado do equipamento.

No evaporador apresentado na **Fig. 2.3**, o vapor do solvente produzido é descartado sem uma preocupação de se utilizar a energia nele contida. Por essa razão o evaporador aí representado recebe o nome de evaporador de simples efeito. Se o vapor do solvente produzido for reutilizado como meio de aquecimento em outro equipamento, o sistema de evaporação recebe o nome de evaporação de múltiplos efeitos. No caso do sistema representado na **Fig. 2.4** tem-se um sistema de três efeitos, em que o solvente evaporado no primeiro e segundo efeitos é reutilizado no segundo e terceiro efeitos respectivamente.

**Figura 2.3** - Representação de um evaporador de simples efeito



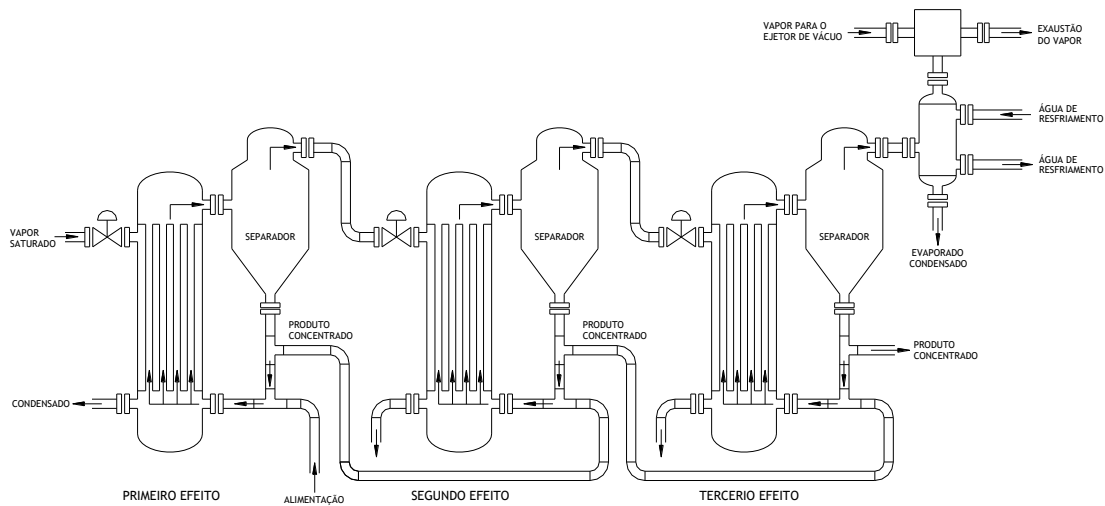
Fonte: BRENNAN (1976)

Em um sistema de evaporação de múltiplos efeitos não se emprega vapor como meio de aquecimento em todos os efeitos, mas reutiliza-se o solvente evaporado em um efeito no subsequente. Com essa configuração obtém-se uma maior eficiência no emprego da energia necessária à evaporação.

As características do alimento que será concentrado influenciam diretamente a operação de concentração. À medida que a água é removida o líquido torna-se mais concentrado, provocando uma redução na velocidade de transferência de calor. A temperatura de ebulição aumenta, reduzindo a

diferença de temperatura. Por outro lado, o aumento da consistência do alimento provoca uma redução no coeficiente global de transferência de calor. Nessas circunstâncias, as seguintes propriedades assumem uma importância particular.

**Figura 2.4** - Representação de um evaporador de múltiplos efeitos



**Fonte:** BRENNAN (1976)

Na sequência são apresentadas algumas características importantes para o correto funcionamento de um evaporador, a saber:

- **Viscosidade e Consistência:** As soluções, quando submetidas a processo de concentração, tornam-se viscosas quando concentradas. Na maioria dos casos, o comportamento não-newtoniano é observado e uma peculiar dependência da temperatura é encontrada devido a efeitos tais como a desnaturação de proteínas (**FELLOWS, 1990**). O aumento da viscosidade diminui a velocidade de escoamento, diminuindo o coeficiente de transferência de calor, reduzindo, assim, a velocidade de transferência de calor (**FOUST, 1982**).
- **Incrustação:** A deposição de escamas ou de sais sobre as superfícies de transferência de calor, durante a evaporação reduz o coeficiente global de transferência de calor. Essa incrustação pode ser devido à adesão dos sólidos suspensos presentes na superfície de transferência de calor. A experiência mostra que a incrustação é menos pronunciada

em líquidos com alta viscosidade se estes escoarem em altas velocidades no interior do evaporador. Essa constatação experimental é explicada devido à ação raspadora que o fluxo exerce sobre as paredes do equipamento (**FENNEMA, 1975; BRENNAN, 1976**).

- **Formação de Espuma:** A formação de espuma estável durante a ebulição é concentrada na maioria dos líquidos. Isso ocorre principalmente quando empregamos pressão reduzida. A formação de espuma é atribuída às forças interfaciais que aparecem entre o vapor, o líquido superaquecido e os sólidos suspensos (**FENNEMA, 1975**).
- **Sensibilidade à temperatura:** Para reduzir o risco de danos térmicos em materiais termo sensíveis durante a evaporação, a temperatura de ebulição deve ser mantida baixa e o tempo de residência do líquido na zona de aquecimento deverá ser reduzido. O abaixamento da temperatura de ebulição é obtido pela redução da pressão de operação no interior do evaporador. Assim, diferenças de temperaturas satisfatórias podem ser obtidas empregando-se o meio de aquecimento em temperaturas mais baixas e empregando um sistema de vácuo adequado. A título de exemplo, sabe-se que é possível a água entrar em ebulição a 75,4°C se a pressão reinante no sistema for de 39,23 kPa.
- **Perda de Aroma:** Os componentes de aroma e sabor em muitos alimentos líquidos, como sucos de frutas e outros, são mais voláteis que a água. Quando tais líquidos são evaporados esses componentes podem ser removidos juntamente com o vapor de água causando uma perda de qualidade do concentrado resultante. Os constituintes voláteis são comumente recuperados da água evaporada, na forma de essência, por destilação fracionada. Essa essência é então adicionada ao concentrado (**BRENNAN, 1976**).

Da mesma forma que a seleção do evaporador é influenciada pelas características da solução que está sendo concentrada, as diferenças de temperatura entre o meio de aquecimento e o líquido que está sendo aquecido, que na realidade é a força motriz responsável pela transferência de calor, também é influenciada por vários fatores (**FENNEMA, 1975**).



- **Pressão externa:** Um líquido ferve quando sua pressão de vapor se torna igual à pressão externa a qual ele está submetido. No caso de produtos alimentícios o solvente é geralmente água – uma substância para a qual as relações pressão de vapor-temperatura estão disponíveis facilmente na literatura.
- **Elevação do Ponto de Ebulição:** O ponto de ebulição de uma solução é maior que aquele do solvente puro à mesma pressão. Quanto mais concentrada for a solução, maior será o ponto de ebulição. Esse aumento é denominado “elevação do ponto de ebulição” ou, simplesmente, “EPE”. Para soluções diluídas ou formadas por coloides orgânicos o “EPE” é pequeno, mas para soluções concentradas de substâncias inorgânicas ele é maior.

### 2.3. Capacidade e Economia de um evaporador

A **capacidade** de um evaporador diz respeito à velocidade de evaporação do solvente que ele é capaz de proporcionar. Por outro lado, a sua **economia** ou eficiência é definida por meio da relação entre a quantidade de solvente evaporada e a quantidade de vapor de aquecimento consumida (**LEONHARDT et al, 1997**).

Se a temperatura de alimentação da solução for igual à temperatura de ebulição reinante no evaporador e este for operado em regime estacionário, todo o calor trocado no equipamento é utilizado essencialmente para evaporar o solvente. Isto posto, pode-se afirmar que a **Eq. (2.1)** se aplica.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T = w_{evap} \cdot \lambda_{evap} \quad (2.1)$$

onde:

- $q$  = Calor trocado por unidade de tempo;
- $U \cdot A$  = Coeficiente global de troca térmica;
- $\Delta T$  = Diferença de temperatura entre o vapor de aquecimento e a solução;
- $w_{evap}$  = Vazão mássica de solvente evaporado; e
- $\lambda_{evap}$  = Calor latente de vaporização do solvente.

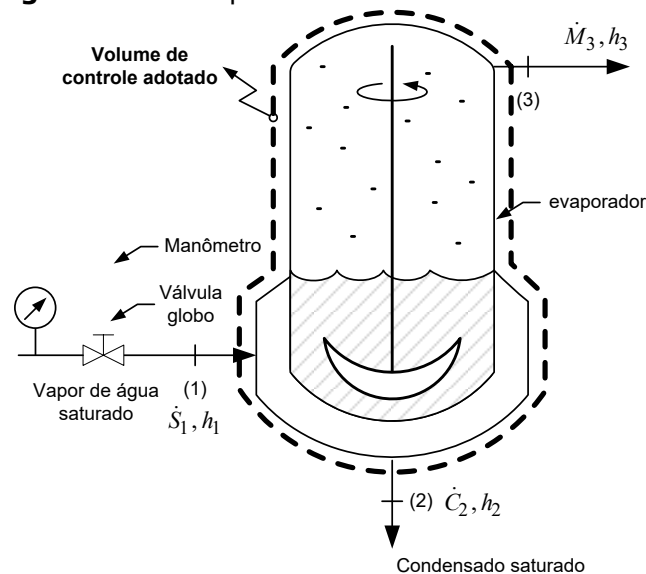
Com base na **Eq. (2.1)**, pode-se afirmar que a capacidade de um evaporador é função do coeficiente global de troca térmica, da diferença de temperatura entre o vapor de aquecimento e a solução no interior do evaporador e, também, do calor latente de vaporização do solvente na pressão de operação do evaporador.

A economia de um evaporador é fortemente influenciada pelo número de efeitos usado e pela temperatura de alimentação da solução concentrada no primeiro efeito. Além desses fatores, o calor latente de vaporização, a elevação do ponto de ebulição (EPE) e as perdas de calor para o ambiente também interferem diretamente com a capacidade e com a economia de um evaporador.

#### 2.4. Vazão de solvente evaporado a partir do vapor de aquecimento

**Sakanoue (2015)** propôs realizar o cálculo da vazão de solvente evaporado com base num balanço global de energia aplicado ao volume de controle definido pelo corpo de um evaporador de simples efeito mostrado na **Fig. 2.5**.

**Figura 2.5** – evaporador e seu volume de controle



**Fonte:** Sakanoue (2015)

O Balanço de Energia aplicado ao volume de controle apresentado na **Fig. 2.5** é apresentado na **Eq. (2.2)**.

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot h_i + \dot{Q} + \dot{W} \quad (2.2)$$

Considerando o sistema como sendo adiabático e que o trabalho de eixo seja desprezível, a **Eq. (2.2)** pode ser simplificada com apresentado na **Eq. (2.3)**.

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot h_i = \dot{S}_1 \cdot h_1 - \dot{C}_2 \cdot h_2 - \dot{M}_3 \cdot h_3 \quad (2.3)$$

Considerando, também, que todo vapor de água saturado que é alimentado seja condensado (o purgador permite afirmar isto), pode-se escrever a **Eq. (2.4)**.

$$\dot{S}_1 = \dot{C}_2 = \dot{S} \quad (2.4)$$

Com base na tabela termodinâmica de propriedades da água, pode-se afirmar que:  $h_1 = h_g$  e  $h_2 = h_f$  (na pressão de operação considerada). Assim sendo, a **Eq. (2.3)** pode ser reescrita como se segue:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{S} \cdot (h_g - h_f) - \dot{M}_3 \cdot h_3 \quad (2.5)$$

Onde o termo entre parênteses representa o calor latente de condensação ( $\lambda_S$ ). Assim, vem que:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{S} \cdot \lambda_S - \dot{M}_3 \cdot h_3 \quad (2.6)$$

Com base nas leis da termodinâmica, sabe-se que a energia interna do sistema pode ser expressa como apresentado na **Eq. (2.7)**.

$$U = M \cdot C_p \cdot T \quad (2.7)$$

Logo, derivando a **Eq. (2.7)** em relação ao tempo, resulta que:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt}(M \cdot C_p \cdot T) = T \cdot C_p \cdot \frac{dM}{dt} \quad (2.8)$$

Substituindo-se a **Eq. (2.8)** na **Eq. (2.6)**, resulta:

$$T \cdot C_p \cdot \frac{dM}{dt} = \dot{S} \cdot \lambda_S - \dot{M}_3 \cdot h_3 \quad (2.9)$$

Aplicando, também, um Balanço de Massa ao volume de controle definido pelo evaporador apresentado na **Fig. 2.5**, pode-se escrever que:

$$\dot{M}_1 - \dot{M}_2 - \dot{M}_3 = \frac{dM}{dt} \quad (2.10)$$

Como  $\dot{M}_1 = \dot{S}_1$  e  $\dot{M}_2 = \dot{C}_2$  e são iguais entre si, resulta que:

$$\frac{dM}{dt} = -\dot{M}_3 \quad (2.11)$$

Assim substituindo-se a **Eq. (2.11)** na **Eq. (2.9)**, vem que:

$$T \cdot C_p \cdot (-\dot{M}_3) = \dot{S} \cdot \lambda_S - \dot{M}_3 \cdot h_3 \quad (2.12)$$

Ou, rearranjando os tem-se que:

$$\dot{M}_3 = \frac{\dot{S} \cdot \lambda_S}{h_3 - C_p \cdot T} \quad (2.13)$$

A **Eq. (2.13)** permite calcular a vazão mássica de solvente evaporado em função da vazão de vapor de água saturado que é alimentada ao evaporador.

## 2.5. Considerações sobre a gestão de informações de processo

O acompanhamento das condições operacionais utilizadas em um processo industrial vem ganhando importância cada vez maior ao longo dos últimos anos por permitir a melhoria contínua da operação da planta por meio do entendimento da dinâmica dos processos, assim como dos eventos que provocaram algum tipo de incidente no processo (**CROWL; LOUVAR, 2015**).

Existem no mercado diversas ferramentas que permitem a gestão do processo e eventos associados ao processo, sendo que algumas já estão incorporadas aos modernos sistemas de controle automático, fazendo parte da sua base de dados ao passo que outras são completamente independentes daqueles sistemas (**KUSIAK, 2018; LI et al, 2017**).

Como exemplo de ferramenta de análise e acompanhamento do processo de uso consolidado na indústria pode-se citar o "PI System" da empresa OSIsoft, que foi criada em 1980 com o objetivo de obter dados de operações confiáveis para ajudar as pessoas a tomar as melhores decisões (**LOJKINE, 2002; SEBRAE, 2018**). O "PI System" é uma plataforma *big data* que captura e analisa informações a fim de construir aquilo que se denomina inteligência operacional.

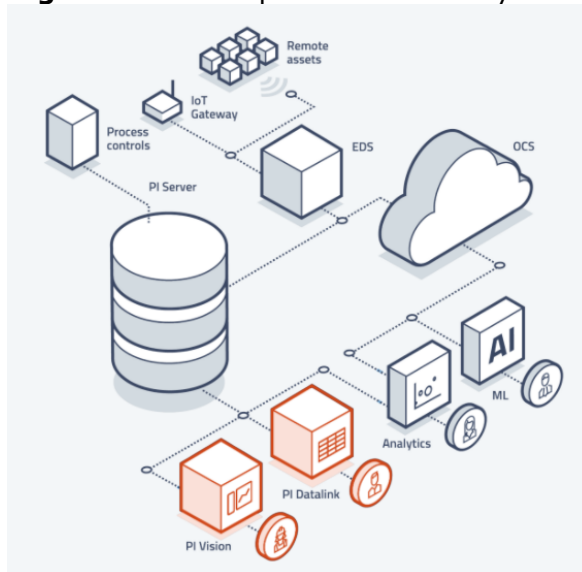
O uso do "PI System" é fundamentado no conceito de coletar, aprimorar e entregar informações confiáveis e de alta qualidade em tempo real. Ele permite as seguintes funções:

- **coleta de dados:** automatiza a coleta de informações em diversos protocolos, sistemas, *gateways* e equipamentos legados.
- **armazenamento de dados:** armazena, de forma segura, as informações do processo e permite acesso imediato a dados históricos, instantâneos ou mesmo se fazer uma previsão de dados.
- **visualização de dados:** criação de relatórios, gráficos, tabelas, *dashboards*, fluxogramas entre outros, com objetivo de monitorar, comparar e otimizar processos.

Ainda hoje, em muitas empresas os indicadores chave de produção e consumo (KPIs, em inglês) são calculados por meio de planilhas, ou até

mesmo manualmente (**WANG et al, 2021**). Isso faz com que a confiabilidade das informações seja baixa, uma vez que pode haver erros ao buscar os dados necessários, ao calcular o valor do parâmetro desejado ou até mesmo divergência na metodologia de cálculo e análise. Nesse caso, o uso do “PI System” permite centralizar as informações de modo a garantir a confiabilidade das informações e cálculos e por consequência proporciona tomadas de decisões mais precisas. Na **Fig. 2.6** é apresentado um diagrama esquemático com os principais elementos que compõem tal *software*.

**Figura 2.6** – Componentes do “PI system”



**Fonte:** OSIsoft (2022)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho foram utilizadas as ferramentas "PI Vision" e "PI Data Link". O "PI Data Link" é um suplemento do MS Excel™ que permite recuperar informações do banco de dados do "PI System" diretamente para uma planilha eletrônica. O "PI Vision" permite a criação de *dashboards* para monitoramento instantâneo do processo.

Foram coletadas informações de processo do evaporador em estudo, de hora em hora, considerando o período de um ano, utilizando-se o "PI Data Link" para tal.

Em seguida, todas as informações foram analisadas, com a participação da equipe de operação, a fim de se definir quais as variáveis de controle do processo que seriam consideradas.

Com base no que foi discutido, chegou-se às seguintes variáveis:

- **"Vapor Real"**: vazão de vapor de água alimentada no evaporador, expressa em kg/h.
- **"DS de entrada"**: percentagem em massa de sólidos no produto que é alimentado ao evaporador.
- **"DS de saída"**: percentagem em massa de sólidos no produto que é retirado do evaporador. Importante destacar que como o DS de saída é uma especificação que depende de cada produto sendo processado, ele foi fixado em 0,82 que corresponde ao DS do produto utilizado como base para a realização deste trabalho.
- **"Entrada de Produto"**: vazão de produto diluído alimentada ao evaporador, expressa em kg/h.
- **"Saída de Produto"**: vazão de produto concentrado retirada do evaporador, expressa em kg/h.

A variável *DS* refere-se ao termo *dry solids*, ou seja, teor de sólidos isentos de umidade, o qual representa a percentagem em massa de sólidos na solução, calculada com base na **Eq. (3.1)**.

$$DS = \frac{\text{Massa de Solido}}{\text{Massa de Solido} + \text{Massa de Agua}} \quad (3.1)$$

Todas as variáveis, com exceção da saída de produto, foram medidas através de transmissores de vazão existentes na linha de produção. A variável “saída de produto” foi calculada usando as demais variáveis por meio de um simples balanço de massa aplicado ao evaporador, calculada com base na **Eq. (3.2)**.

$$Saida\ de\ Produto = \frac{Entrada\ de\ Produto\ Seco}{DS\ de\ saida} \quad (3.2)$$

Contudo, com base no conhecimento adquirido pela equipe de processo envolvida no projeto, sabe-se que a variável de processo “Entrada de Produto Seco” pode ser calculada pelo emprego da **Eq. (3.3)** e que o valor da variável de processo “DS de Saída” foi fixado em 0,82.

$$Entrada\ de\ Produto\ Seco = Entrada\ de\ Produto \cdot DS\ de\ Entrada \quad (3.3)$$

Diante do anteriormente exposto, pode-se calcular o valor da variável de processo “Saída de Produto” com base na **Eq. (3.4)**.

$$Saida\ de\ Produto = \frac{Entrada\ de\ Produto \cdot DS\ de\ Entrada}{0,82} \quad (3.4)$$

Outra variável importante definida foi a “Eficiência do Evaporador”, representada pela letra Y. Ela é calculada com base na **Eq. (3.5)**, a cada hora, durante o período de um ano, e expressa em toneladas de água evaporada por tonelada de vapor de aquecimento consumida.

$$Y = \frac{\text{Água Evaporada}}{\text{Vapor Consumido}} \quad (3.5)$$

Ao calcular-se o valor de Y, percebeu-se que esta variável se mantinha praticamente constante em torno do valor 2,5. Além disso a especificação técnica do evaporador em questão recomenda que o equipamento seja operado com a eficiência e torno de 2,5 (**Cargill, 2009**). Sendo assim, em consenso com a equipe de operação e o gestor do projeto, o Y foi fixado em 2,6.



Para se desenvolver o modelo matemático abordado neste trabalho foi necessário utilizar os valores históricos das variáveis de processo de interesse, como por exemplo aquelas apresentadas a título de exemplo na **Tabela 3.1**. A etapa de amostragem consiste em coletar partes de um conjunto de dados de forma que seja possível realizar inferências sobre todo o conjunto. Ou seja, a amostragem permite concluir sobre o todo analisando apenas partes. A representatividade da amostra está diretamente ligada com a quantidade de informações analisadas e sua confiabilidade. Sendo assim, nesse trabalho, foram utilizadas informações correspondentes a 1 ano de operação, as quais foram filtradas de maneira a descartar aquelas não representativas, correspondentes a falhas de instrumentação ou parada de produção.

**Tabela 3.1** – Amostra de dados no PI Vision.

Date	Vapor Real	DS Entrada	DS Saída	Entrada de Produto	Saída de Produto
Unit	[kg/h]	%	%	[kg]	[kg]
10-fev-21 11:00:00	9160,38	42,47	82,28	39829,42	20561,67
10-fev-21 14:00:00	9675,10	39,82	80,98	38509,05	18937,67
10-fev-21 15:00:00	9512,78	38,37	81,18	40965,38	19362,31
10-fev-21 16:00:00	9354,09	40,50	82,46	40906,80	20090,51
10-fev-21 17:00:00	9016,86	40,30	82,14	39815,73	19531,57
10-fev-21 18:00:00	9044,55	38,02	81,37	39194,38	18314,97
10-fev-21 19:00:00	9471,98	36,29	81,98	38844,19	17194,03
10-fev-21 20:00:00	9667,12	35,90	81,24	38583,11	17047,27
10-fev-21 21:00:00	9504,73	34,96	82,48	39451,74	16719,83
10-fev-21 22:00:00	9125,81	35,88	82,13	39671,61	17330,77
10-fev-21 23:00:00	8781,65	36,90	81,89	40601,27	18297,48
11-fev-21 00:00:00	8622,76	39,39	79,03	40476,73	20172,65
11-fev-21 01:00:00	8283,85	40,85	81,98	41232,09	20548,55
11-fev-21 02:00:00	8123,67	40,75	81,93	41143,86	20463,04
11-fev-21 03:00:00	8413,10	38,00	80,98	40847,05	19170,33
11-fev-21 04:00:00	8742,74	36,42	81,77	41542,39	18500,85
11-fev-21 05:00:00	8441,18	40,07	82,08	41780,75	20394,98
11-fev-21 06:00:00	8503,44	40,84	82,23	40927,15	20329,16
11-fev-21 07:00:00	8336,12	41,08	81,62	40514,60	20394,32
11-fev-21 08:00:00	7885,86	44,29	83,10	41405,91	22068,81
11-fev-21 09:00:00	8505,84	44,90	82,45	41527,24	22615,59
11-fev-21 10:00:00	8213,81	43,97	81,51	41860,50	22584,12
11-fev-21 11:00:00	8464,98	42,89	81,67	41998,94	22055,97
11-fev-21 12:00:00	8399,94	38,92	80,12	41118,03	19976,71
11-fev-21 13:00:00	8736,90	39,04	82,08	36826,63	17517,45

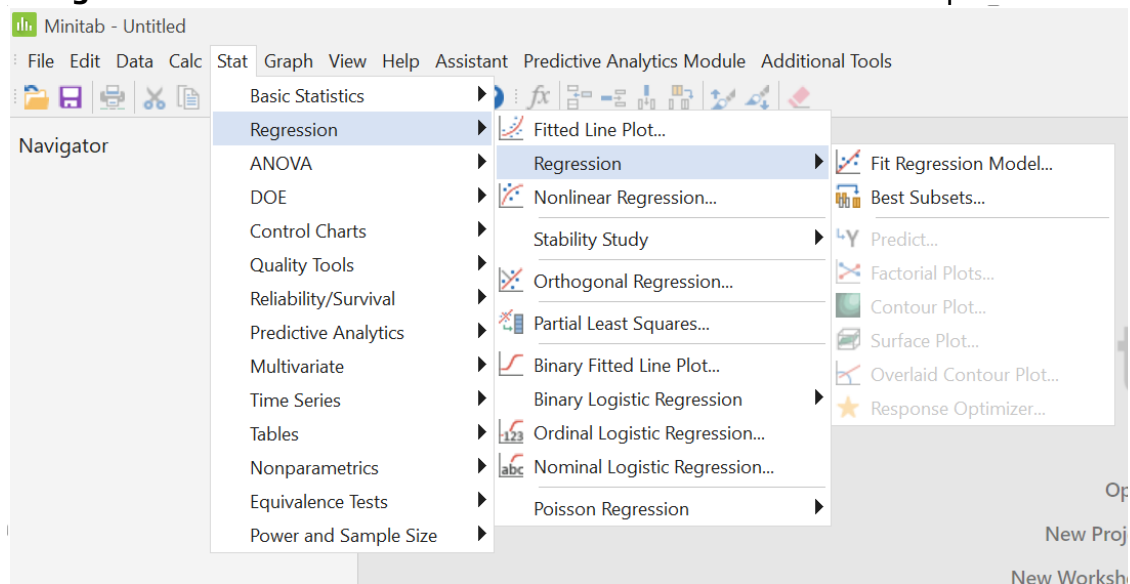
De posse das informações filtradas, usou-se o aplicativo MiniTab™, com objetivo de prever um modelo para o consumo de vapor em função das variáveis escolhidas, de modo a garantir a eficiência do equipamento assim como reduzir a alimentação de vapor.

Os valores das variáveis de processo associadas à operação do evaporador foram transferidos para a planilha de inserção de dados do MiniTab™ e, na sequência, usou-se o comando “Best Subsets” para comparar todas as

possibilidades de modelos possíveis a partir da combinação das variáveis propostas. Na **Fig. 3.1** é apresentada uma imagem correspondente à tela de seleção de opções correspondente ao módulo de análise preditiva.

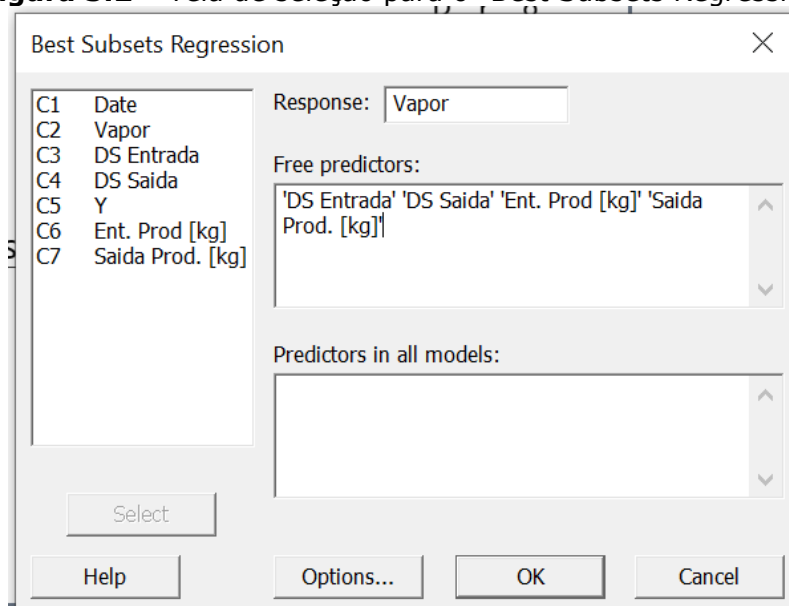
Nessa etapa, a variável **VAPOR** foi considerada como a resposta do modelo, ou seja, a incógnita a ser definida (o “y” da equação). Enquanto as demais foram consideradas como as variáveis independentes da equação, como mostrado na **Fig. 3.2**.

**Figura 3.1** – Tela do assistente de acesso ao módulo de análise preditiva



Fonte: autoria própria

**Figura 3.2** – Tela de seleção para o “Best Subsets Regression”



Fonte: autoria própria

Na **Fig. 3.3** é apresentada a imagem correspondente à tela de apresentação dos resultados correspondentes ao modelo preditivo ajustado pelo aplicativo MiniTab™.

**Figura 3.3** – Tela de apresentação dos resultados

**Response is Vapor**

Vars	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)	Mallows	Cp	S	a	]	Y
1	88,2	88,2	88,2	53109,2	621,58	X			
1	68,7	68,7	68,7	150228,7	1011,5	X			
2	93,0	93,0	93,0	29270,1	479,69	X	X		
2	92,8	92,8	92,7	30337,4	486,93	X	X		
3	98,8	98,8	98,8	189,4	198,51	X	X	X	
3	97,2	97,2	97,1	8166,1	302,85	X	X	X	
4	98,8	98,8	98,8	22,9	195,72	X	X	X	X
4	98,8	98,8	98,8	111,9	197,21	X	X	X	X
5	98,8	98,8	98,8	6,0	195,42	X	X	X	X

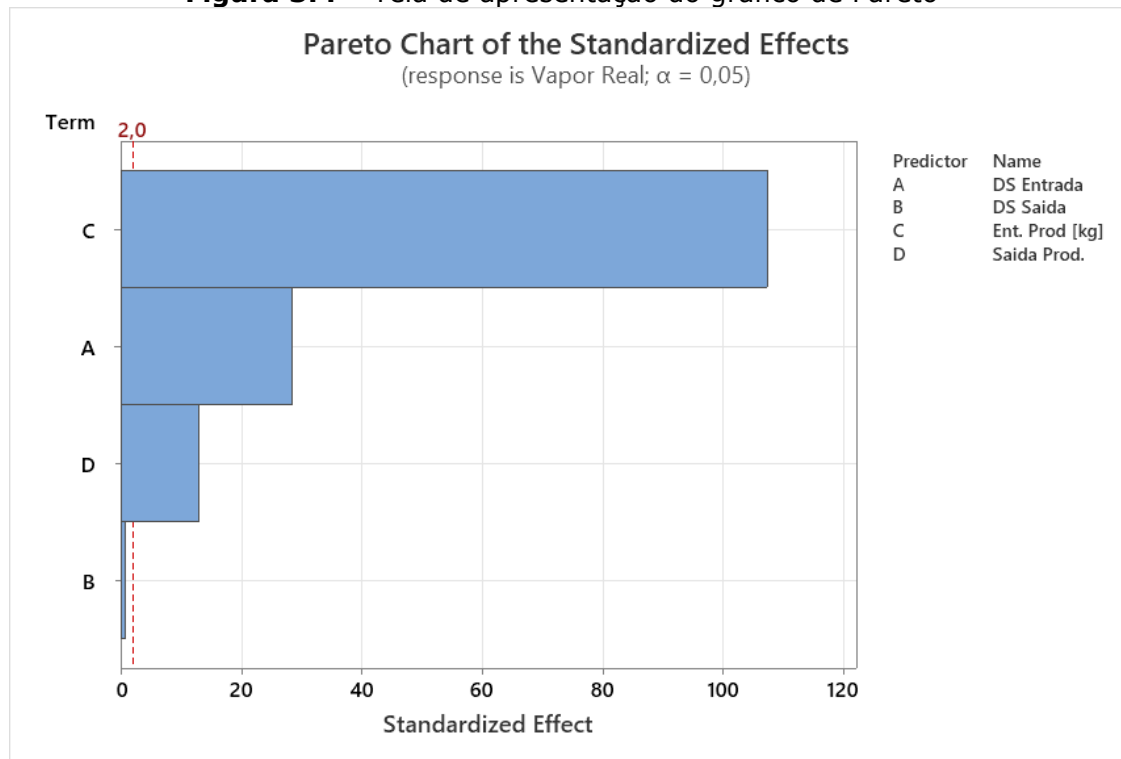
**Fonte:** autoria própria

Usando ainda o aplicativo MiniTab™, foi possível construir o gráfico de Pareto correspondente à influência que cada variável independente apresenta na correlação que prediz o consumo de vapor de aquecimento no evaporador, como mostrado na **Fig. 3.4**.

Com base no gráfico de Pareto conclui-se que as variáveis de maior impacto no consumo de vapor são: **Entrada de Produto, DS Saída e Saída de Produto**. De posse dessa conclusão e dos valores de R<sup>2</sup> para cada combinação, definiu-se adotar o modelo com R<sup>2</sup> = 0,972 incluindo as

seguintes variáveis: **DS de entrada, Entrada de Produto e Saída de Produto.**

**Figura 3.4** – Tela de apresentação do gráfico de Pareto



**Fonte:** autoria própria

A partir da análise realizada foi possível encontrar a equação de predição do consumo de vapor. Após obter a equação de predição, foi iniciada a etapa de configuração da correlação encontrada na base de dados do historiador.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo matemático desenvolvido com base na metodologia apresentada na Seção 3 deste trabalho de conclusão de curso é mostrado na **Eq. (4.1)**.

$$\begin{aligned} \text{Vapor} = & 7.170,1 - 14,39 \cdot \text{DS Entrada} + 0,39030 \cdot \text{Ent. Prod [kg]} - 0,3680 \cdot \\ & \cdot \text{Saida Prod [kg]} - 2.669,3 \cdot Y \end{aligned} \quad (4.1)$$

O modelo desenvolvido apresentou  $R^2 = 0,9881$ . O  $R^2$ , também conhecido como coeficiente de determinação, é uma medida estatística de quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada. O  $R^2$  está sempre entre 0 e 100%:

- 0% indica que o modelo não explica nada da variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média.
- 100% indicam que o modelo explica toda a variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média.

Em geral, quanto maior o valor de  $R^2$ , melhor o modelo se ajusta aos valores experimentais. No presente caso, pode-se concluir que o modelo desenvolvido representa de forma satisfatória o processo estudado.

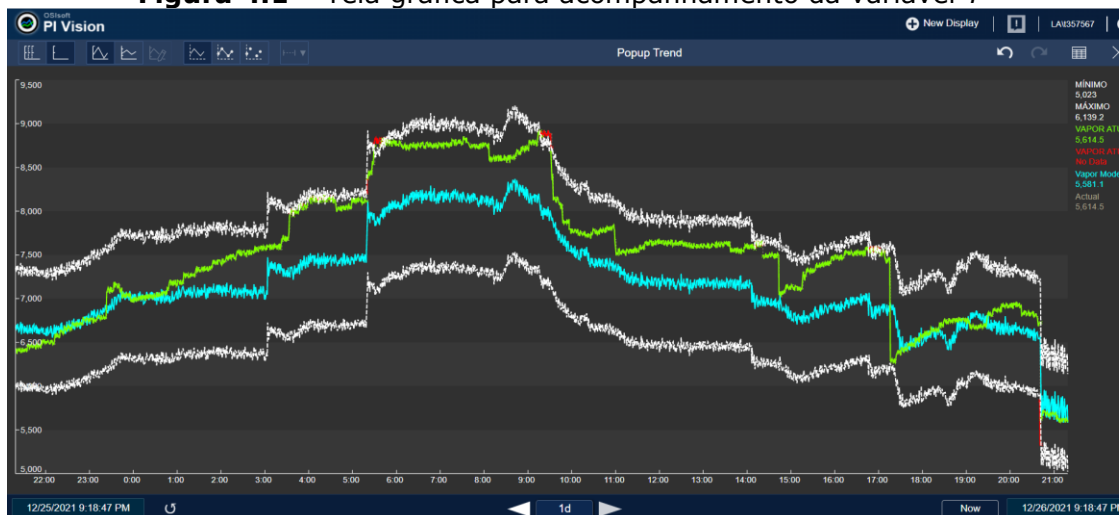
Adicionalmente, foi desenvolvida uma tela do tipo **gráfico de registro de tendencia**, de visualização instantânea, contendo os resultados do modelo desenvolvido e os seus respectivos parâmetros de análise, tais como os limites inferior e superior para o consumo real de vapor.

O limite superior de consumo real de vapor de aquecimento foi definido como sendo igual a 10% acima do valor registrado do consumo de vapor de aquecimento estimado pelo modelo. De maneira semelhante, o limite inferior foi definido como sendo igual a 10% abaixo. O desenvolvimento da tela de registro de tendencia foi feito com base no aplicativo PI Vision™, como mostrado na **Fig. 4.1**.

No gráfico podem ser observados os valores dos limites inferior e superior, representados pelas curvas na cor branca. O consumo de vapor calculado pelo modelo desenvolvido é representado pela curva na cor azul claro. O

consumo real de vapor, medido instantaneamente, é representado pela curva na cor verde quando está compreendida dentro dos limites estipulados pelas curvas na cor branca. Quando o consumo real ultrapassar os limites anteriormente citados, a curva será apresentada na cor vermelha.

**Figura 4.1** – Tela gráfica para acompanhamento da variável Y

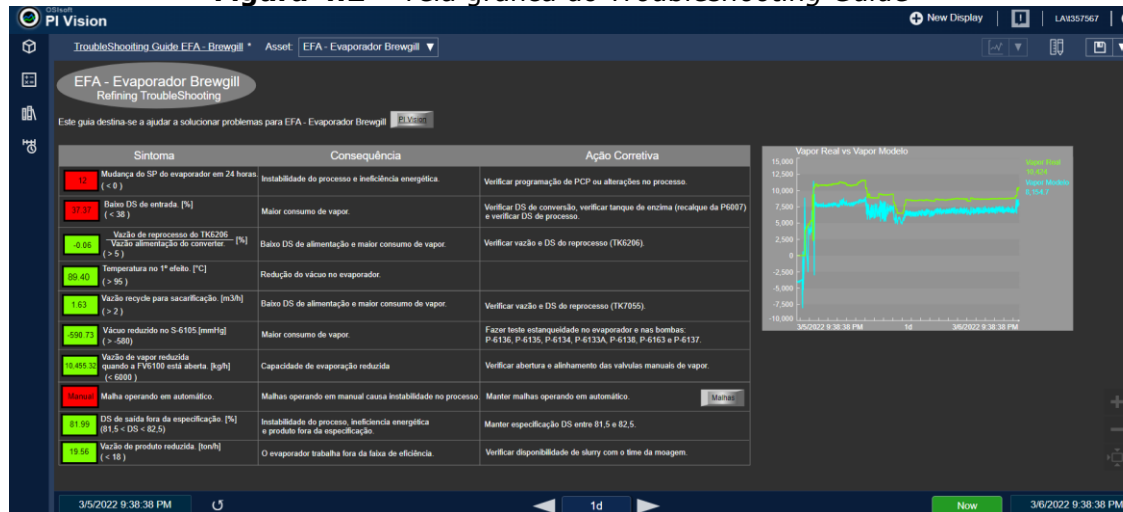


Fonte: autoria própria

Em seguida, foi desenvolvido e inserido no sistema a tela contendo o *Troubleshooting Guide*. Este consiste em um guia prático para resoluções de problemas relacionados com a operação dos evaporadores. As informações que constam do *Troubleshooting Guide* foram definidas em conjunto com a equipe de operação e contemplam as principais possíveis causas de consumo excessivo de vapor de aquecimento, tendo sido definidas tanto a(s) consequência(s) como as ações corretivas para cada uma delas. Na **Fig. 4.2** é apresentada a tela em questão.

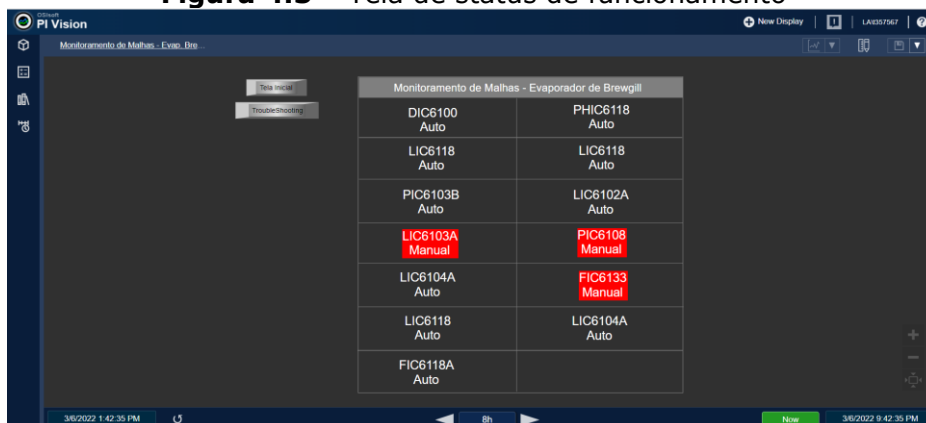
No *Troubleshooting Guide* cada sintoma está acompanhado de um *tag* atribuído para a variável de interesse, associado a um alarme, que tem a sua cor mudando de verde para vermelho, quando ela sai da especificação definida. À direita da tela, é possível acompanhar as curvas do vapor real consumido e do vapor estimado pelo modelo, por meio de um pequeno gráfico de tendência. Além disso, no sintoma que monitora as malhas de controle, existe um botão que, uma vez pressionado, leva a uma outra tela que exhibe os status de funcionamento das malhas monitoradas, como mostrado na **Fig. 4.3**.

**Figura 4.2** – Tela gráfica do *Troubleshooting Guide*



Fonte: autoria própria

**Figura 4.3** – Tela de status de funcionamento



Fonte: autoria própria

Em seguida iniciou-se a etapa de treinamento dos operadores de processo. O treinamento foi feito em 4 dias, sendo um turno por dia. Teve a duração de aproximadamente 30 minutos cada e consistiu em validar a veracidade dos sintomas, consequências e ações corretivas propostas.

Durante a etapa de treinamento e implementação do projeto pode-se observar entusiasmo e colaboração por parte da equipe operacional. A tela e o *troubleshooting* são ajustados sempre que necessário, de acordo com as sugestões e demandas da equipe.

A partir do acompanhamento diário da tela foi possível identificar novas demandas de automação e instrumentação que prejudicavam o processo, mas que muitas vezes não eram percebidas.

O relatório que apresenta os ganhos do projeto tem previsão de início para maio de 2022. O relatório apresenta informações comparativas entre o consumo de vapor e o funcionamento da operação como todo, antes e depois da implementação do projeto.



## **5 CONCLUSÃO**

A definição do modelo preditivo foi realizada com sucesso e a sua implementação no historiador PI System™ existente na unidade industrial estudada foi igualmente bem sucedida.

Após a implementação do modelo preditivo, o consumo de vapor de aquecimento alimentado ao evaporador em estudo passou a ser monitorado de maneira mais eficiente, permitindo reduzir o seu consumo durante as condições de afastamento da operação desejada.

Além disso, o projeto garante aos operadores maior controle do processo e permite tomadas de decisões ágeis e de maneira preventiva, assegurando a segurança e contribuindo para a minimização dos riscos inerentes ao processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRENNAN, J.G. **Food Engineering Operations**. 2<sup>nd</sup>. ed. London: Applied Science, 1976
- CARGILL. **Relatório interno de avaliação de desempenho de evaporador**. Uberlândia, 2009.
- CROWL, D.A.; LOUVAR, J.F. **Segurança de Processos Químicos - Fundamentos e Aplicações**. 3<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- FELLOWS, P. **Food processing Technology: Principles and Practice**. 2<sup>nd</sup>. ed. London: Ellis Horwood, 1990.
- FENNEMA, O.R. **Principles of Food Science**. 3<sup>rd</sup>. ed. New York: Marcel Dekker, 1975.
- FOUST, A.S. **Princípios das Operações Unitárias**. 6<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
- HELMAN, D.R. **Food Process Engineering**. 2<sup>nd</sup>. ed. Westport: AVI, 1975.
- JOSLYN, M.A.; HEID, J.L. **Food Processing Operations**. 1<sup>st</sup>. ed. Westport: AVI, 1964.
- KUSIAK, A. **Smart manufacturing**. *Int J Prod Res* 56(1-2):508–517. 2018. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- LEONHARDT, G.F.; KUNIGK, L.; WESTPHALEN, D.L. **Operações Unitárias da Indústria de Alimentos: Concentração ou Evaporação**. São Caetano do Sul, 1997. 91p. Notas de aula. Departamento de Engenharia Química e de Alimentos, Escola de Engenharia Mauá.
- Li, Bo-hu; HOU, Bao-cun; YU, Wen-tao; LU, Xiao-bing; YANG, Chun-wei. **Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review**. *Frontiers Inf Technol Electronic Eng* **18**, 86–96. 2017. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601885>
- LOJKINE, J. **A revolução informacional**. 3<sup>a</sup> ed. São Paulo: Cortez, 2002.
- MEHRA, D.K. Selecting Evaporators. **Chemical Engineering**. n.3. p.56-72, 1986.

OSIsoft. **O “PI System” potencializa insights operacionais e novas possibilidades.** Disponível em: <https://www.osisoft.pt/pi-system>. Acesso em: 20 de maio de 2022.

SAKANOUE, T.F. **Desenvolvimento de KPI para avaliar a economia de energia em evaporadores industriais.** Uberlândia, 2015. 50p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia.

SEBRAE. **Artigo Industria 4.0.** Rio de Janeiro, 2018.

SINGH, R.P.; HELMAN, D.R. **Introduction to Food Engineering.** 2<sup>nd</sup>. ed. California: Academic Press, 1991.

WANG, B.; TAO, F.; FANG, X.; LIU, C.; LIU, Y.; FREIHEIT, T. **Smart Manufacturing and Intelligent Manufacturing: A Comparative Review.** *Engineering*, Volume 7, Issue 6, 738-757. 2021. ISSN 2095-8099. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.017>.

WOLFF, S. **Informatização do trabalho e reificação: uma análise à luz dos Programas de Qualidade Total.** 1<sup>a</sup> ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2006.