



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**



MATHEUS DA SILVA ZANON

**AS VERSATILIDADES DO MICROSOFT EXCEL® E SUA UTILIZAÇÃO NA
ENGENHARIA**

**UBERLÂNDIA
2021**

MATHEUS DA SILVA ZANON

**AS VERSATILIDADES DO MICROSOFT EXCEL® E SUA UTILIZAÇÃO NA
ENGENHARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva.

UBERLÂNDIA

2021

MATHEUS DA SILVA ZANON

**AS VERSATILIDADES DO MICROSOFT EXCEL® E SUA UTILIZAÇÃO NA
ENGENHARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de graduação em Engenharia Química.

Uberlândia, 05 de novembro de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva, FEQUI/UFU.

Prof. Dr. Jader Conceição da Silva, FEQUI/UFU.

Prof.^a Dr.^a Sarah Arvelos Altino, FEQUI/UFU.

RESUMO

O Microsoft Excel é um programa com muitas possibilidades de aplicação, que vão muito além de simples pastas de trabalho e cálculos triviais. O software da Microsoft pode ser utilizado para o desenvolvimento de simples planilhas a complexos painéis, conhecidos como *dashboards*, fazendo-se uso das mais diversas funções pertencentes ao programa, ou programadas através de macros por meio de sua própria linguagem, o *Visual Basic for Application* (VBA). Acredita-se que, no âmbito da comunidade acadêmica, o uso do software seja por vezes menosprezado e sua abrangência de funcionalidades pouco conhecida. Assim sendo, entende-se que o conhecimento de suas possibilidades de aplicação deva ser disseminado na academia. Diante do exposto, buscou-se realizar uma revisão da literatura sobre o Microsoft Excel e apresentar algumas entre muitas aplicações do software na área da engenharia, em especial a engenharia química, para uso em empresas ou no meio acadêmico. Na literatura é possível encontrar uma grande quantidade de trabalhos mostrando sobre o uso do Excel, diante disso, realizou-se uma ampla busca na literatura, selecionando e apresentando algumas relevantes e atualizadas aplicações do programa. Apresentou-se aplicações do Excel em diferentes áreas do conhecimento: no dimensionamento de bombeio mecânico com hastes; na avaliação de árvores de falhas; na visualização de actogramas; na resolução de treliças planas; na redução de erros em pesquisas sistemáticas; na resolução de equações da teoria de Michaelis-Menten; na análise em colunas de multiestágios; na otimização em sequências de destilação; na otimização de sistemas em rede de trocadores de calor. Com base nas aplicações apresentadas, percebe-se que o Excel é uma potencial ferramenta a ser usada nas engenharias. Através do Excel, engenheiros e estudantes da área são capazes de desenvolverem planilhas práticas, de fácil manuseio e com custo favorável para resolverem problemas que variam dos simples aos mais complexos processos. Com isso, conclui-se que o Excel merece destaque no meio acadêmico, propiciando a formação de profissionais capacitados a resolverem problemas através do desenvolvimento e manuseio de planilhas eletrônicas.

Palavras-chave: excel; aplicações do excel; softwares na engenharia; engenharia química.

ABSTRACT

Microsoft Excel is a program with many application possibilities, which go far beyond simple workbooks and trivial calculations. Microsoft software can be used to develop simple spreadsheets to complex panels, known as dashboards, making use of the most diverse functions belonging to the program, or programmed through macros through its own language, Visual Basic for Application (VBA). It is believed that, within the academic community, the use of software is sometimes underrated and its range of functionalities little known. Therefore, it is understood that knowledge of its application possibilities should be disseminated in the academy. Given the above, sought to carry out a literature review on Microsoft Excel and present some among many applications of the software in the field of engineering, especially chemical engineering, for use in companies or in academia. In the literature it is possible to find a large amount of documents showing the use of Excel, therefore, an extensive literature search was carried out, selecting and presenting some relevant and updated applications of the program. Excel applications in different areas of knowledge were presented: in the design of mechanical pumping with rods; in evaluating fault trees; viewing actograms; in the resolution of flat trusses; in reducing errors in systematic research; in solving Michaelis-Menten theory equations; in multistage column analysis; in optimization in distillation sequences; in the optimization of heat exchanger network systems. Based on the applications presented, it is clear that Excel is a potential tool to be used in engineering. Through Excel, engineers and students in the field are able to develop practical, easy-to-handle and cost-effective spreadsheets to solve problems ranging from simple to more complex processes. With this, it is concluded that Excel deserves prominence in the academia, providing the formation of professionals capable of solving problems through the development and handling of electronic spreadsheets.

Keywords: excel; excel applications; engineering software; chemical engineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desenvolvimento do presente trabalho.....	11
Figura 2 – Janela do Solver no Excel 2013.....	13
Figura 3 - Dados do estudo sobre bombeio mecânico com hastes.....	20
Figura 4 - Tela de soluções do simulador.	21
Figura 5 - Especificações dos dados gerais na planilha Excel.....	23
Figura 6 - Especificação dos dados de Confiabilidade de componentes na planilha Excel.	23
Figura 7 - Especificação dos dados de lógica da árvore de falhas na planilha Excel.	24
Figura 8 - Análise de Pareto baseado na medida de importância Redução de Risco.	24
Figura 9 - Determinação dos CM mais importantes de um sistema de segurança em usina nuclear.....	25
Figura 10 - Análise da indisponibilidade instantânea para a árvore de falha em uma usina nuclear.....	25
Figura 11 - Exemplo de inserção de dado no Excel para construção de actogramas.	26
Figura 12 - Exemplo do processamento dos dados no Excel para actogramas.....	27
Figura 13 - Exemplo do processamento dos dados com barras no Excel.....	28
Figura 14 - Processamento na planilha para construção do mapa de calor para actogramas.....	29
Figura 15 - Actogramas processados através do Excel. (A) Tipo convencional; (B) Mapa de calor.....	29
Figura 16 - Exemplo de entrada de dados no Excel para resolução de treliças.....	30
Figura 17 - Sistema de coordenadas locais.	31
Figura 18 - Modelos de treliças do estudo.	32
Figura 19 - Resultados gráficos para o modelo 1 de treliças.....	33
Figura 20 - Resultados gráficos para o modelo 2 de treliças.....	33
Figura 21 - Resultados gráficos para o modelo 3 de treliças.....	34
Figura 22 - Resultados gráficos para o modelo 4 de treliças.....	34
Figura 23 - Exemplo da separação dos por conceitos em colunas no Excel.	35

Figura 24 - Exemplo visual da distribuição das fórmulas nas células na planilha.	36
Figura 25 - Exemplos da criação de strings por conceito e a string única.....	37
Figura 26 - Modelo de planilha para determinar as constantes cinéticas.	39
Figura 27 - Inserção dos dados de entrada na planilha para destilação multiestágios.	42
Figura 28 - Células com os títulos para os dados de equilíbrio.	43
Figura 29 - Células com as entradas dos títulos para os estágios.	44
Figura 30 - Planilha para o método McCabe-Thiele após a conclusão do procedimento.....	46
Figura 31 - Esquema das possíveis estruturas sequenciais de destilação.	47
Figura 32 - Planilha com os valores inseridos para otimização de colunas de destilação.	49
Figura 33 - Planilha com os valores obtidos após o uso do solver nas colunas de destilação.	50
Figura 34 - Intervalos de temperatura para os dados do caso estudado.	52
Figura 35 - Diagrama de cascata para os intervalos de temperatura 1 e 2.....	53
Figura 36 - Diagrama de cascata para os intervalos de temperatura 3, 4 e 5.....	54
Figura 37 - Planilha eletrônica para otimização do sistema em rede de trocadores de calor.	54
Figura 38 - Janela de aplicação do solver na otimização dos trocadores de calor....	55
Figura 39 - Valores obtidos na otimização dos trocadores de calor após a aplicação do solver.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Boletim de notas para exemplificar o uso da função indireto.	17
Tabela 2 - Equações de diferentes modelos para serem usadas no Excel.	40
Tabela 3 - Dados experimentais para uma mistura etanol/água.	43
Tabela 4 - Fórmulas inseridas na planilha de destilação em multiestágios, nas colunas A, B e C.	44
Tabela 5 - Fórmulas inseridas para construção da planilha de destilação em multiestágios. Parte 1.	45
Tabela 6 - Fórmulas inseridas para construção da planilha de destilação em multiestágios. Parte 2.	45
Tabela 7 - Valores de α_k , β_k e K_k para cada coluna de destilação.	49
Tabela 8 - Propriedades das correntes.	51
Tabela 9 - Entalpias das correntes quentes e frias em cada intervalo de temperatura.	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNCIONALIDADES DO EXCEL	12
2.1	Gerenciador de nomes	12
2.2	Solver	12
2.3	VBA	14
2.4	Funções	14
2.4.1	Função CONCAT	15
2.4.2	Função CORRESP	15
2.4.3	Função ÉCÉL.VAZIA	16
2.4.4	Função ÍNDICE	16
2.4.5	Função INDIRETO	17
2.4.6	Função MÁXIMO	17
2.4.7	Função POTÊNCIA	17
2.4.8	Função PROCV	18
2.4.9	Função SE	18
2.4.10	Função SOMA	18
2.4.11	Função UNIRTEXTO	18
3	EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DO EXCEL	19
3.1	Bombeio mecânico com hastes	19
3.2	Avaliação de árvores de falhas	22
3.3	Visualização de actogramas	26
3.4	Resolução de treliças planas	30
3.5	Redução de erros em pesquisas sistemáticas	34
3.6	Aplicações na engenharia química	37
3.6.1	Equações integradas de Michaelis-Menten	37
3.6.2	Destilação em colunas de multiestágios	41
3.6.3	Otimização em sequências de destilação	47
3.6.4	Sistemas em rede de trocadores de calor	51
4	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
	REFERÊNCIAS	58
	ANEXO A – Equações para bombeio mecânico com hastes	61
	ANEXO B - Código VBA para planilha de destilação binária em multiestágios	65

ANEXO C - Equações das restrições para o sistema em rede de trocadores de calor.	69
ANEXO D - Fórmulas inseridas na janela de restrições do Solver para otimização de sistemas em rede de trocadores de calor.	70
ANEXO E - Restrições para o Solver na otimização da sequência de destilação.	71

1 INTRODUÇÃO

O Microsoft Excel é um software de planilhas eletrônicas, lançado pela empresa Microsoft em 1985 para o sistema operacional MAC e em 1987 para Windows. Com o passar do tempo a Microsoft foi aperfeiçoando seu software adicionando diversas funções e ferramentas, sendo o primeiro a permitir personalizações das planilhas, como fonte, tamanho e cor. Na sua versão 5.0 foi incluída a ferramenta *Visual Basic for Applications* (VBA), uma poderosa linguagem de programação para facilitar a exploração das funcionalidades do programa, permitindo uma ótima automação nas planilhas eletrônicas através de macros (MEYER, 2013). No momento a versão mais recente lançada é o Excel do pacote Office 365.

Em meio ao momento em que vivemos e às incertezas do futuro próximo devido à pandemia causada pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2), é difícil estimar quando a convivência social retornará para como o de costume. Em momentos que locais públicos e institucionais estão com acesso limitado devido ao cuidado do distanciamento e isolamento, dificultando, por exemplo, a utilização de softwares nos espaços físicos das instituições, uma alternativa de menor custo, fácil aprendizado e que possibilite executar a tarefa de casa é de enorme utilidade. O Microsoft Excel pode ser essa alternativa para várias aplicações.

O poderoso programa da Microsoft, muitas vezes subestimado no meio acadêmico, não é uma modesta plataforma apenas para a criação de simples planilhas eletrônicas. No Microsoft Excel também é possível criar planilhas complexas para as mais variadas aplicações em diversas áreas do conhecimento, utilizando suas diversas ferramentas como VBA e *Solver*, além da sua ótima e limpa interface gráfica, possibilitando ao usuário desenvolver incríveis *dashboards*.

No estudo de Figueira e Veit (2004) apresentou-se uma planilha para auxiliar professores e alunos nos laboratórios de física, mostrando-se por meio de experimentos que o uso do Excel nos laboratórios é uma importante e eficiente ferramenta. Devido ao tempo que é gasto, à facilidade de uso e ao aprendizado através dos gráficos fornecidos pelas análises em tempo real, o uso do Excel possibilita professores e estudantes focarem na parte prática dos fenômenos físicos em vários experimentos.

Existem muitas outras aplicações do software nas mais diferentes áreas do conhecimento, além de métodos de ensino utilizando o Excel que poderiam auxiliar

intensamente no meio acadêmico, mas que são na maioria pouco aproveitados ou até mesmo ignorados. O Excel é uma ferramenta que facilmente poderá vir a ser um objeto de estudo nos cursos de graduação no futuro se sua evolução continuar nesse ritmo. Segundo Formby, Medlin e Ellington (2017), devido ao crescimento do Excel desde seu lançamento (em 1985) e de sua aplicabilidade usando tabelas, gráficos, cálculos de dados estatísticos e criação de fórmulas, o software tem ganhado mais espaço nas empresas, as quais demandam pessoas que tenham conhecimento e habilidades para trabalharem com as planilhas.

Na literatura é possível encontrar uma grande quantidade de trabalhos mostrando aplicações do Excel. Diante do exposto, o presente trabalho tem o objetivo de realizar uma revisão da literatura sobre o Microsoft Excel e apresentar algumas entre muitas aplicações do software para uso em empresas ou no meio acadêmico. Segundo Rother (2007), revisões deste tipo permitem ao leitor adquirir e atualizar o conhecimento sobre uma temática específica em curto espaço de tempo. A revisão em questão visa a trazer ao conhecimento dos leitores algumas funcionalidades do Excel, discorrendo como o estudo do mesmo e de suas aplicações podem ser de grande utilidade em diversas áreas profissionais e do ensino, como na engenharia, principalmente na Engenharia Química.

Na Figura 1 é mostrado como está estruturado o desenvolvimento do presente trabalho. Em que, o capítulo 2 apresenta algumas funcionalidades do Excel e no capítulo 3 alguns dos exemplos de aplicação do Excel encontrados na literatura.

Figura 1 – Desenvolvimento do presente trabalho.

<p>Cap. 2 - FUNCIONALIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gerenciador de nomes; • Solver; • VBA; • Funções.
<p>Cap. 3 - APLICAÇÕES DO EXCEL</p> <ul style="list-style-type: none"> • no dimensionamento de bombeio mecânico com hastes; • na avaliação de árvores de falhas; • na visualização de actogramas; • na resolução de treliças planas; • na redução de erros em pesquisas sistemáticas; • na resolução de equações da teoria de Michaelis-Menten; • na análise em colunas de multiestágios; • na otimização em sequências de destilação; • na otimização de sistemas em rede de trocadores de calor.

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

2 FUNCIONALIDADES DO EXCEL

As planilhas do Excel são compostas por linhas e colunas, sendo que uma planilha possui um total de um milhão e quarenta e oito mil e quinhentas e setenta e seis linhas e dezesseis mil e trezentas e oitenta e quatro colunas (ESPECIFICAÇÕES E LIMITES DO MICROSOFT EXCEL, [s. d.]). O cruzamento de uma linha com uma coluna é chamado de célula. A célula tem a função de armazenar informações, podendo ser um texto, um número ou uma fórmula. Cada célula possui um endereço de identificação, o qual é formado pela letra da coluna e pelo número da linha (ESES, 2019). Por exemplo, a célula B5, está localizada na coluna B e na linha 5.

2.1 Gerenciador de nomes

O gerenciador de nomes é uma importante ferramenta no desenvolvimento de planilhas grandes ou complexas. Permite ao usuário nomear células ou intervalos de células e usar o nome para referenciar suas respectivas células na utilização de fórmulas. Facilita-se a navegação em planilhas com muitas células, auxilia-se o entendimento de planilhas ou fórmulas, inserem-se comentários, entre outras das mais funcionais utilidades. A janela do gerenciador de nomes permite ao usuário visualizar e editar todos os nomes inseridos na planilha, bem como suas posições e valores, podendo ser realizada uma pesquisa utilizando-se filtros (USAR O GERENCIADOR DE NOMES NO EXCEL, [s. d.]).

2.2 Solver

O *Solver* é um suplemento encontrado no Microsoft Excel que possibilita ao usuário fazer testes de hipóteses, sendo muito útil para encontrar variáveis que satisfaçam determinada função objetivo. Pode-se usar o *Solver* para encontrar o valor ideal, sendo o mesmo o valor exato, máximo ou mínimo para satisfazer à operação, respeitando as restrições impostas (DEFINIR E RESOLVER UM PROBLEMA USANDO O SOLVER, [s. d.]). Na Figura 2 é mostrada a janela do suplemento *Solver* no Microsoft Excel versão 2013, em que se observam algumas definições importantes.

Figura 2 – Janela do Solver no Excel 2013.

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Na caixa Definir Objetivo, insere-se a função que deverá ser satisfeita para que os cálculos encerrem com êxito. Na opção Alternando Células Variáveis, entra-se com as células que terão seus valores alterados pelo Solver, a fim de se obter solução que satisfaça as exigências da função objetivo. Na caixa de restrições, inserem-se todas as limitações que o Solver deve respeitar, de modo a chegar nos valores mais próximos do desejado. Por fim, outra entrada importante para o desenvolvimento dos cálculos é a seleção do método a ser utilizado pelo Solver, podendo ser escolhido na parte inferior da janela do suplemento (DEFINIR E RESOLVER UM PROBLEMA USANDO O SOLVER, [s. d.]).

Segundo CHARLIE YOUNG ([s. d.]), na seleção do método de solução, o Excel possui três métodos, sendo o “GRG Não Linear”, “LP Simplex” e o “Evolutionary”. O GRG não linear consiste em determinar a inclinação da função objetivo de acordo com a variação dos valores de entrada, e quando as derivadas parciais são iguais a zero, o algoritmo estabelece o valor como sendo a solução ótima do problema. Entre os métodos não-lineares, o GRG é o mais veloz, porém o mesmo é imensamente dependente das condições iniciais, podendo finalizar no valor ideal mais próximo das

condições iniciais estabelecidas, sendo que o valor considerado ideal pode ser ou não o melhor resultado global para a otimização realizada. O método LP Simplex tem a sua aplicação limitada a apenas funções lineares, com um algoritmo de resolução matricial. O LP Simplex é altamente recomendado para funções lineares, pois é certo que a solução obtida será a globalmente ótima.

De acordo com CHARLIE YOUNG ([s. d.]), outro método capaz de obter soluções para funções não-lineares é o Evolutionary, sendo que comparado ao GRG, é mais provável que encontre uma solução globalmente ótima, em contrapartida, possui um algoritmo muito lento para obter tal solução. De modo superficial, o algoritmo funciona com o princípio da seleção natural. É determinado um conjunto de soluções em potencial, então definido a melhor solução do conjunto, e a partir desse valor, é gerado um novo conjunto de possíveis soluções, repetindo até que ocorra a convergência, ou seja, a melhor solução de um conjunto seja quase idêntica à melhor solução do conjunto anterior.

Resumindo, o *Solver* através de algoritmos altera o valor das células variáveis, a fim de atingir a condição de êxito da célula estabelecida como objetivo, respeitando as limitações impostas ao problema e inseridas na caixa de restrições.

2.3 VBA

O *Visual Basic for Applications* (VBA) do Excel é uma potente linguagem de programação que permite aos usuários programarem dentro da planilha. Assim, é possível a realização de cálculos ou procedimentos mais complexos, automatização da planilha executando comandos automaticamente e interação com outras funcionalidades, propiciando ótimas combinações na busca da melhor planilha para cada situação (RODRIGUES, 2020). O VBA é uma linguagem de fácil aprendizado, sendo acessível para usuários iniciantes no Excel desenvolverem códigos mais simples a códigos mais avançados. Pois é completa o suficiente para que usuários experientes desenvolvam códigos mais robustos, podendo até mesmo resultar na implementação de novas funcionalidades que o software não possuía previamente.

2.4 Funções

As funções próprias do Excel favorecem os usuários nas mais diversas utilidades, na realização de cálculos, organização de texto, entre outras

funcionalidades (KURTZ, 2019). Na sequência apresentam-se algumas funções que são mencionadas nos trabalhos discutidos pela presente revisão e podem ser muito úteis na criação de diferentes planilhas.

2.4.1 Função CONCAT

A finalidade da função CONCAT é unir o texto de vários intervalos ou cadeias de caracteres. Sua sintaxe de entrada nas células é **=CONCAT(*texto1*;*texto2*;...)**, em que *texto1* é o texto a ser unido e *texto2* em diante são os textos que serão adicionados ao texto inserido como *texto1*. Outra forma de se obter o mesmo resultado é utilizando o *ampersand*, cuja sintaxe seria **=&(texto1;texto2;...)** (CONCAT (FUNÇÃO CONCAT), [s. d.]).

Por exemplo, suponha-se que a célula A1 possui o texto “Engenharia” e a B1 possui “Química”. Quando se aplica **=CONCAT(“Excel”;“ ”;”na”;” ”;A1;” “;B1)** na célula C1, a mesma retornará o texto “Excel na Engenharia Química”. Nas versões do Excel em que não se é possível encontrar a função CONCAT, pode-se usar a função CONCATENAR como alternativa (CONCAT (FUNÇÃO CONCAT), [s. d.]). Destaca-se que no exemplo fornecido a digitação de “ ” (abertura de aspas, seguido de espaço e fechamento das aspas), é equivalente à inserção de um espaço no texto que aparecerá na célula C1 como resultado da função.

2.4.2 Função CORRESP

A função CORRESP procura um determinado conteúdo em um intervalo de células e retorna à posição da célula em que se encontra o conteúdo. A sintaxe da função é **=CORRESP(valor_procurado;matriz_procurada;tipo_correspondência)**. A entrada *valor_procurado* é o valor que se deseja encontrar e *matriz_procurada* é o intervalo de células em que a função fará a busca. Para o *tipo_correspondência* há três opções de entrada (FUNÇÃO CORRESP, [s. d.]):

- a) 1 ou não especificado, busca o maior valor que é menor ou igual ao valor procurado (a matriz precisa estar em ordem crescente);
- b) 0, busca o primeiro valor que é exatamente igual ao valor procurado;
- c) -1, localiza o menor valor que é maior ou igual ao valor procurado (a matriz precisa estar em ordem decrescente).

Por exemplo, suponha-se que os valores das células A1, A2, A3 e A4 sejam 5, 10, 13 e 20, respectivamente. Digitando-se **=CORRESP(14;A1:A4;1)** na célula B1, por exemplo, é retornado a posição 3, pois é a posição da célula que se encontra o menor valor (13) mais próximo de 14.

2.4.3 Função ÉCÉL.VAZIA

A função ÉCÉL.VAZIA retorna VERDADEIRO caso a célula em que se faz referência for vazia, caso contrário, retorna FALSO. Por exemplo, supondo-se que a célula A1 possua um valor e a célula A2 esteja vazia; ao digitar **=ÉCÉL.VAZIA(A1)**, exemplificando, na célula B1, o resultado será FALSO (pois a célula A1 não é vazia); e ao digitar **=ÉCÉL.VAZIA(A2)**, por exemplo, na célula B2, o resultado será VERDADEIRO (pois a célula A2 é vazia) (É (FUNÇÕES É), [s. d.]).

2.4.4 Função ÍNDICE

A função ÍNDICE trabalha com o objetivo de retornar um valor ou a referência de um valor em determinado intervalo. A função pode ser usada de duas maneiras (ÍNDICE (FUNÇÃO ÍNDICE), [s. d.]):

- a) o objetivo é retornar o valor de uma célula ou uma matriz de células;
- b) o objetivo é retornar uma referência a determinadas células.

Para o primeiro caso, a sintaxe é **=ÍNDICE(matriz;num_linha;num_coluna)**, no qual *matriz* é o intervalo de células; *num_linha* é a linha do valor a ser retornado; e *num_coluna* é a coluna do valor que será retornado. Por exemplo, a função **=ÍNDICE(A1:C3;1;2)** retornará o valor presente na linha 1 e na coluna 2 do intervalo ou tabela A1 até C3 (ÍNDICE (FUNÇÃO ÍNDICE), [s. d.]).

Para o segundo caso do uso da função ÍNDICE, o qual retorna uma referência, a sintaxe é **=ÍNDICE(referência;num_linha;num_coluna;num_área)**, *referência* é a referência a um ou mais intervalos de células; *num_linha* é o número da linha de onde será obtido a referência; *num_coluna* é o número da coluna de onde será obtido a referência; e *num_área* (opcional) é o intervalo de células em *referência* que será obtido *num_linha* e *num_coluna*. Tendo como exemplo, a função **=ÍNDICE(A1:C3;1;2)** retornará o conteúdo da célula presente na primeira linha e segunda coluna, sendo retornado o conteúdo da célula B1 (ÍNDICE (FUNÇÃO ÍNDICE), [s. d.]).

2.4.5 Função INDIRETO

A função INDIRETO atua de modo a obter a referência especificada por uma cadeia de texto. Então, a referência é avaliada e seu conteúdo exibido. Por exemplo, dada a Tabela 1, ao usar **=INDIRETO(B1)**, o resultado obtido é 9, pois a função faz referência a célula B1, a qual faz referência a célula B2, que possui o valor 9 (INDIRETO (FUNÇÃO INDIRETO), [s. d.]).

Tabela 1 - Boletim de notas para exemplificar o uso da função indireto.

	A	B	C	D
1	Nota Português	Nota Matemática	Nota Física	Química
2	7	9	8	8

Fonte: elaborada pelo autor (2021).

2.4.6 Função MÁXIMO

A função MÁXIMO retorna o maior valor dentre um conjunto determinado. A sintaxe é **=MÁXIMO(número1;número2;...)**, em que *número1* é o valor inicial e *número2* em diante são os valores a serem comparados pela função (FUNÇÃO MÁXIMO, [s. d.]).

Por exemplo, o valor da célula A1 é igual a 7 e o da célula B1 é igual a 1, a função **=MÁXIMO(A1;B1;5)** retornará o valor 7, pois o mesmo é maior que 1 e 5.

2.4.7 Função POTÊNCIA

A função POTÊNCIA retorna o resultado de um determinado valor elevado a uma determinada potência, sendo sua sintaxe **=POTÊNCIA(número;potência)**, em que *número* é o valor a ser elevado e *potência* é o expoente que elevará o valor da base. Outra possibilidade de calcular a potência de um número é utilizando o símbolo **^** (FUNÇÃO POTÊNCIA, [s. d.]).

2.4.8 Função PROCV

A função PROCV pesquisa um determinado valor em uma tabela. A sintaxe é **=PROCV(valor_procurado;matriz_tabela;num_índice_coluna;intervalo_pesquisa)** (PROCV (FUNÇÃO PROCV), [s. d.]).

Por exemplo, o valor da célula B2 é “Engenharia” e C2 é “Química” a função **=PROCV(B2;B1:D4;2;FALSO)** procurará “Engenharia” na tabela B1:D4 e retornará o valor exato da célula correspondente da segunda coluna da tabela, ou seja, retornará “Química”. Se fosse inserido “VERDADEIRO” em vez de “FALSO”, retornaria uma correspondência aproximada.

Nas versões mais recentes do Excel tem-se disponível a função PROCV. A nova função permite ao usuário atingir o mesmo resultado da PROCV, com algumas vantagens e mais praticidade (CAMPISSEI, 2020).

2.4.9 Função SE

A função SE é uma funcionalidade do Excel muito utilizada. A função compara o valor objetivo para uma determinada condição. A sintaxe é **=SE(condição;verdadeiro;falso)**, em que *condição* é o que será analisado; *verdadeiro* é o que a função retornará se a condição for verdadeira; e *falso* é o que a função retornará se for falso (SE (FUNÇÃO SE), [s. d.]).

Por exemplo, para **=SE(A1=0;1;2)** retornará 1 se A1 for igual a 0, ou retornará 2, caso o valor de A1 seja diferente de 0.

2.4.10 Função SOMA

A função SOMA retorna o resultado da operação de adição de determinados valores, a sintaxe é **=SOMA(número1;número2;...)**, em que *número1* e o *número 2* em diante são valores da operação (SOMA (FUNÇÃO SOMA), [s. d.]).

2.4.11 Função UNIRTEXTO

A função UNIRTEXTO junta o texto de vários intervalos ou cadeias de caracteres, adicionando um delimitador especificado pelo usuário entre cada valor de texto. A diferença da função UNIRTEXTO para a CONCAT, sendo que as duas fazem combinações de texto, é a inserção do delimitador entre os textos combinados (FUNÇÃO UNIRTEXTO, [s. d.]).

A sintaxe =UNIRTEXTO(*delimitador;ignorar_vazio;texto1;texto2*), em que *delimitador* é o termo que será inserido entre os textos combinados e a entrada *ignorar_vazio* não combinará células vazias se receber VERDADEIRO (FUNÇÃO UNIRTEXTO, [s. d.]).

3 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DO EXCEL

A seguir, são apresentados alguns dos muitos exemplos de aplicações do Excel na engenharia encontrados na literatura, mostrando um pouco do que esse programa desenvolvido pela Microsoft pode contribuir tanto na prática dos engenheiros quanto no ensino para a formação de novos profissionais nas universidades.

3.1 Bombeio mecânico com hastes

Quando um reservatório não fornece energia suficiente para elevar os fluidos até a superfície, são utilizados os métodos de elevação artificial, os quais consistem no fornecimento de energia ao fluido encontrado no fundo do poço por meio da implementação de diversos equipamentos. Os principais métodos artificiais de elevação são bombeio mecânico com hastes (BM), bombeio centrífugo submerso (BCS), bombeio por cavidades progressivas (BCP), e *gás-lift* contínuo ou intermitente (GLC ou GLI). Para escolher o método que melhor se aplica em determinado poço, analisa-se a localização do poço, profundidade, vazão, quantidade de gás, segurança, entre outros fatores. O método denominado bombeio mecânico, o qual consiste em transformar o movimento rotativo de um motor em movimento alternativo na coluna de hastes, conseqüentemente transmitindo o movimento ao fundo do poço e realizando a elevação dos fluidos através de uma bomba de fundo, é o mais utilizado entre os métodos de elevação em poços *onshore*, pois apresenta baixo valor de investimento inicial, manutenção simples e capacidade de elevar baixas e médias vazões de óleo (SIMONELLI; LOBATO DOS SANTOS; DELA FONTE, 2017).

O sucesso da implementação do bombeio mecânico em um poço de petróleo está diretamente associado ao seu dimensionamento, visando maximizar a produção e minimizar os custos de instalação e manutenção. Simonelli, Lobato dos Santos e Dela Fonte (2017) elaboraram uma planilha eletrônica no Excel que calcula rapidamente, através de equações utilizadas no método convencional de projeto (poços rasos ou com profundidade média de até 250m) presentes na literatura, as

variáveis exigidas para o dimensionamento da unidade de bombeio. O dimensionamento é responsável por determinar os parâmetros de operação e contribuir na seleção dos equipamentos de superfície e subsuperfície a serem utilizados. O usuário insere os dados de entrada e o sistema calcula-se a vazão de líquido produzida, a velocidade de bombeio, a potência requerida pelo motor principal entre outros dados fundamentais para o bombeio mecânico.

O procedimento para o dimensionamento utilizado no trabalho de Simonelli, Lobato dos Santos e Dela Fonte (2017) envolve uma série de equações, as quais são descritas no ANEXO A.

Para a construção da planilha, insere-se no Excel as equações descritas no ANEXO A, desenvolvendo um simulador de fácil entendimento para o usuário, capaz de dimensionar o sistema de bombeio mecânico com hastes de forma rápida e prática. O usuário insere as variáveis de entrada uma única vez, como no exemplo da Figura 3, e a planilha retorna os resultados do dimensionamento, como é apresentado na Figura 4.

Figura 3 - Dados do estudo sobre bombeio mecânico com hastes.

Dimensionamento do sistema de bombeio mecânico	
Objetivo: realizar o dimensionamento do sistema de bombeio mecânico de forma rápida e eficaz. O usuário deve inserir os dados no sistema americano.	
Dados de entrada	
Comprimento da manivela (c)	37,000 in
Dimensão da viga 1 (d ₁)	96,050 in
Dimensão da viga 2 (d ₂)	111,000 in
Diâmetro do pistão (d _p)	2,500 in
Seção haste 1, diâmetro (d _{r1})	in
comprimento(L1)	ft
Seção haste 2, diâmetro (d _{r2})	in
comprimento(L2)	ft
Seção haste 3, diâmetro (d _{r3})	0,750 in
comprimento (L3)	4000,000 ft
Seção haste 4, diâmetro (d _{r4})	in
comprimento(L4)	ft
Comprimento da coluna (D)	4000,000 ft
Gravidade específica do fluido (S _f)	0,904
Comprimento da biela (h)	112,120 ft
Quantidade de ciclos por minuto (N)	cpm
Tipo da unidade de bombeio (1 = convencional ; -1 balanceada a ar)	1,000
Fator de aceleração máxima admissível (L)	0,400
Eficiência volumétrica da bomba (E _v)	0,800
Fator volume formação do óleo (B _o)	1,200 bbl/stb
Diâmetro interno do tubo (d _i)	2,995 in
Diâmetro externo do tubo (d _o)	3,500 in
Profundidade do líquido do anular (H)	4000,000 ft
Pressão na cabeça da tubulação (ptf)	100,000 psia
Gravidade específica do líquido	0,904
Fator de segurança (F _s)	1,350

Fonte: Simonelli, Lobato dos Santos e Dela Fonte (2017).

Figura 4 - Tela de soluções do simulador.

1 ETAPA		
Comprimento da haste polida	$S = 2c \frac{d_2}{d_1}$	85,518 in
Área ocupada pelo pistão	$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4}$	4,906 in ²
Área da seção da haste	$A_r = \frac{\pi d_r^2}{4}$	0,442 in ²
Área total	$A_t = \frac{\pi d_t^2}{4}$	2,576 in ²
Peso das hastes no ar	$W_r = \frac{\gamma_r D A_r}{144}$	6010,156 lbs
Quantidade de fluido carregada	$W_f = S_f (62.4) \frac{D A_p}{144}$	7689,468 lbs
2 ETAPA		
Carga máxima na haste polida	$PRL_{max} = W_r - S_f (62.4) \frac{W_r}{\gamma_r} + W_r + W_r F_1$	17779,853 lbs
Carga mínima na haste polida	$PRL_{min} = -S_f (62.4) \frac{W_r}{\gamma_r} + W_r - W_r F_2$	2914,042 lbs
Contrapeso	$C = \frac{1}{2} (PRL_{max} + PRL_{min})$	10346,948 lbs
Torque máximo	$T = \frac{1}{4} S \left(W_r + \frac{2SN^2 W_r}{704712} \right)$	317823,470 in.lbs
3 ETAPA		
Limite de velocidade	$N = \sqrt{\frac{70471.2L}{S(1-\frac{1}{4})}}$	22,180 cpm
Curso do pistão	$S_p = S - \frac{12D}{E} \left[W_r \left(\frac{1}{A_t} + \frac{1}{A_r} \right) - \frac{SN^2 M W_r}{70471.2 A_r} \right]$	70,172 in
Vazão da bomba	$q = 0.1484 \frac{A_p N S_p E_v}{B_s}$	755,483 stb/dia
Net lift	$L_N = H + \frac{P_f}{0.433\gamma_l}$	4255,467 ft
Potência necessária devido as perdas por atrito	$P_f = 6.31 \times 10^{-7} W_r S N$	7,194 hp
Potência hidráulica	$P_h = 7.36 \times 10^{-6} q \gamma_l L_N$	21,391 hp
Potência necessária para o motor principal	$P_{pm} = F_s (P_h + P_f)$	38,589 hp

Fonte: Simonelli, Lobato dos Santos e Dela Fonte (2017).

A planilha construída no Excel por Simonelli, Lobato dos Santos e Dela Fonte (2017) permite realizar o dimensionamento de modo mais rápido e preciso, desde que para realizar manualmente o procedimento descrito em seu trabalho é requerido um tempo considerável para o desenvolvimento dos cálculos, além de estar sujeito a erros por desatenção.

3.2 Avaliação de árvores de falhas

No trabalho de Oliva *et al.* (2018), foi desenvolvida uma planilha através do uso de macros para o importante procedimento de avaliação de árvores de falhas. Árvores de moderada complexidade em aplicações na indústria, nas mais diversas áreas como engenharia nuclear, aeronáutica, engenharia de fatores humanos e gerenciamento de segurança. Áreas em que os perigos são elevados, necessitando de sistemas seguros e confiáveis para reduzir os riscos, considerando os erros humanos e falhas nos equipamentos.

A análise por árvores de falhas se dá através de uma técnica de análise de sistemas em que são constituídos cenários, formados por uma série de eventos combinados, considerando os eventos de falha e erros humanos simultaneamente, fornecendo resultados com um alto nível de confiabilidade. Para isso é necessário o uso de um software capaz de executar os cálculos necessários, realizando avaliações qualitativas e quantitativas, nos mais variados casos de árvores complexas e interdependentes (OLIVA *et al.*, 2018).

A metodologia clássica na indústria nuclear é baseada na avaliação de Cortes Mínimos (CM), processo sistemático de substituição dos portões lógicos por suas entradas, gerando gradualmente combinações de eventos, as quais determinam a ocorrência do evento não desejado. O método apresenta dois grandes problemas que são fatores de preocupações em sua aplicação. Um dos problemas é a possibilidade de uma enorme quantidade de combinações de eventos gerados, e conseqüentemente fora de controle, tanto pela falta de capacidade de armazenamento quanto pelo longo tempo de execução, fenômeno denominado como explosão combinatória. O outro problema ocorre quando é necessário um processo de redução booleana por meio de uma comparação de eventos, para determinar as combinações com o número mínimo imprescindível de eventos que determinam a falha do sistema, requerendo uma grande capacidade de armazenamento e longos tempos de execução (OLIVA *et al.*, 2018).

De acordo com Oliva *et al.* (2018), a determinação dos CM foi realizada de modo a identificar e avaliar apenas as combinações que são CM, gerando e testando uma grande quantidade de combinações, mas sem necessitar da redução booleana e do armazenamento dos CM gerados, pois cada CM é gerado, avaliado e descartado. Para a tomada de decisões foi preciso apenas um número reduzido de CM, os de

maiores probabilidades e de contribuição a possibilidade de falha total. Foram-se desenvolvidos os algoritmos em VBA, os conhecidos Macros, para determinar os CM em uma planilha do Excel capaz de avaliar as árvores de falhas de mediana complexidade. Para o desenvolvimento do algoritmo foram aplicadas as seguintes técnicas: fatoração de eventos não repetidos entrando; utilização de um procedimento recursivo para a formação das combinações de eventos; e estabelecimento de uma ordem de seleção dos componentes para a formação das combinações.

As principais facilidades que a planilha proposta e desenvolvida por Oliva *et al.* (2018) são:

- a) especificações dos dados gerados, mostrados na Figura 5;

Figura 5 - Especificações dos dados gerais na planilha Excel.

Dados gerais	
Formato dos CM	Números
Avaliação dos CM como	eventos raros
Portão Topo	1
Número máximo de CM	5000
Ordem máxima dos CM	15
Probabilidade de Corte	1,00E-07

Fonte: Oliva *et al.* (2018).

- b) inserção de dados de confiabilidade, com cálculos automatizados das probabilidades de falha de cada evento, mostrados Figura 6;
- c) especificação dos dados da lógica da árvore de falhas, possibilitando checar a consistência da árvore, exibidos na Figura 7;

Figura 6 - Especificação dos dados de Confiabilidade de componentes na planilha Excel.

No	Código	Tipo	Taxa de falha [1/h]	Prob. / Freq. de falha [1/a]	Intervalo entre testes [h]	Tempo de teste [h]	Indispon. do teste	Tempo de reparo [h]	Tempo Espera / Operação / Inicial [h]	EF	Indispon. / Prob. de falha
1	CM-RR246S10/O	Espera	4,80E-07		240					3,0	5,76E-05
2	CM-RR246D01-S	Espera	2,58E-07		240					4,0	3,10E-05
3	CM-RR246S22-F	Espera	9,60E-07		240					5,0	1,15E-04
4	CM-RR246S05-O	Espera	4,80E-07		240					6,0	5,76E-05
5	CM-RR246D01-R	Operação	2,58E-06						24	3,0	6,19E-05
6	CM-RR246S17-O	Espera	4,80E-07		240					4,0	5,76E-05
7	CM-RR246S18-E	Espera	4,80E-07		240					5,0	5,76E-05
8	CM-RR246S10-E	Espera	4,80E-07		240					6,0	5,76E-05
9	CM-RR246S04-F	Espera	9,60E-07		240					3,0	1,15E-04
10	CM-RR246S11-F	Espera	9,60E-07		240					4,0	1,15E-04
11	H3-RR60D01	Espera		1,00E-03						5,0	1,00E-03

Fonte: Oliva *et al.* (2018).

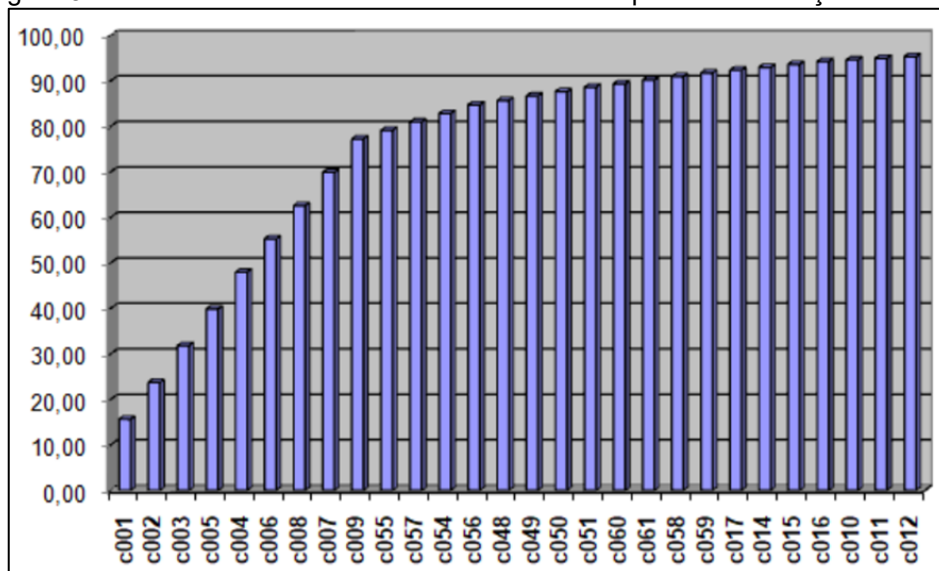
Figura 7 - Especificação dos dados de lógica da árvore de falhas na planilha Excel.

Verificação		Reset		Renumerar		Reset		Matar (q=1)	
No	Código	Tipo	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
1	C1	1	-2	-3					
2	C2	1	-221	-226	-231	-236	-241	-246	-247
3	C3	2	-4	-5					
4	C4	3	-6	-7	-8	-9			
5	C5	4	-10	-11	-12	-13			
6	C6	1	-14	-22					
7	C7	1	-15	-23					
8	C8	1	-16	-24					
9	C9	1	-17	-25					
10	C10	1	-18	-22					
11	C11	1	-19	-23					
12	C12	1	-20	-24					
13	C13	1	-21	-25					
14	C14	3	-26	-27	-128				
15	C15	3	-29	-30	-132				

Fonte: Oliva *et al.* (2018).

- d) resultado total de probabilidade de falha do sistema e análise da medida de importância Redução de Risco (RRW) na forma de um Diagrama de Pareto, ilustrado na Figura 8;

Figura 8 - Análise de Pareto baseado na medida de importância Redução de Risco.



Fonte: Oliva *et al.* (2018).

- e) determinação dos principais CM em ordem de probabilidade, apresentados na Figura 9;

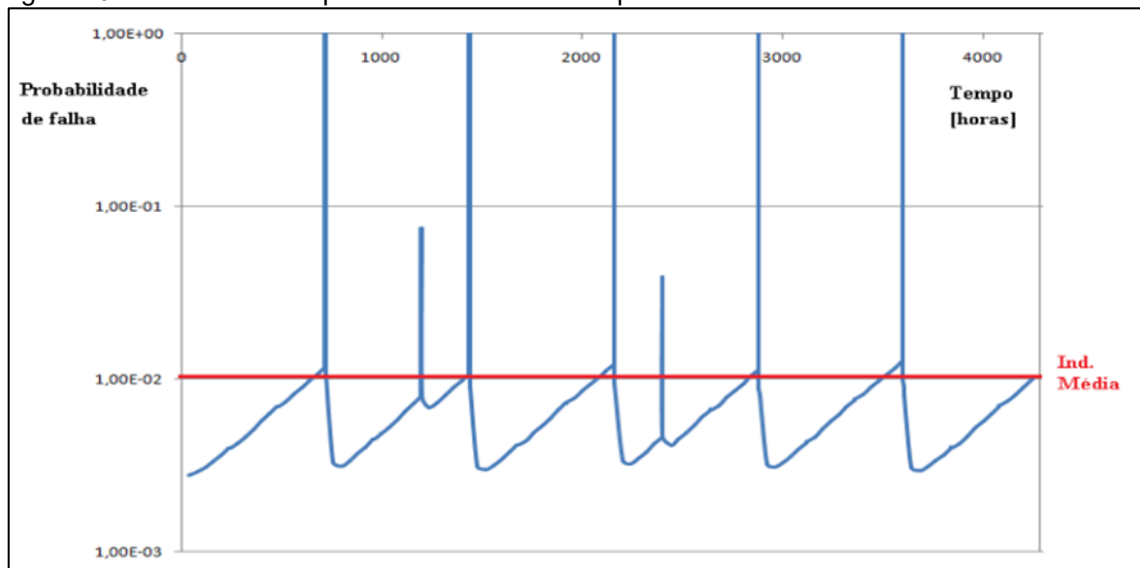
Figura 9 - Determinação dos CM mais importantes de um sistema de segurança em usina nuclear.

0:00:31		100%		Calcular			
No.	Prob.	Pr. Acum.	%	% Acum.	E1	E2	E3
1	1,00E-03	1,00E-03	16,57	16,57	H3-RR40S21-O1		
2	7,60E-04	1,76E-03	12,60	29,17	LF-1BV13Q-C	NOMNT-TF20	
3	8,44E-05	1,84E-03	1,40	30,57	NOMNT-TF60	LF-RL40S03-F	LF-RR20S04-F32
4	8,44E-05	1,93E-03	1,40	31,97	NOMNT-TF60	LF-RL40S03-F	LF-RR20S04-F1
5	8,44E-05	2,01E-03	1,40	33,37	NOMNT-TF60	LF-RL40S03-F	LF-RR20S11-F1
6	8,29E-05	2,10E-03	1,37	34,74	NOMNT-TF60	LF-RL40S03-F	LF-TF44S31-O
7	4,32E-05	2,14E-03	0,72	35,46	NOMNT-TF60	LF-RR20S04-F1	LF-RR20S11-F1
8	4,32E-05	2,18E-03	0,72	36,17	NOMNT-TF60	LF-RR20S11-F1	LF-RR20S22-F1
9	4,32E-05	2,23E-03	0,72	36,89	NOMNT-TF60	LF-RR20S22-F1	LF-RR20S04-F32
10	4,32E-05	2,27E-03	0,72	37,60	NOMNT-TF60	LF-RR20S04-F1	LF-RR20S22-F1
11	4,32E-05	2,31E-03	0,72	38,32	NOMNT-TF60	LF-RR20S11-F1	LF-RR20S04-F32
12	4,24E-05	2,35E-03	0,70	39,02	NOMNT-TF60	LF-TF44S31-O	LF-RR20S22-F1
13	4,24E-05	2,40E-03	0,70	39,72	NOMNT-TF60	LF-TF44S31-O	LF-RR20S04-F1
14	4,24E-05	2,44E-03	0,70	40,43	NOMNT-TF60	LF-TF44S31-O	LF-RR20S04-F32

Fonte: Oliva *et al.* (2018).

- f) obtenção da indisponibilidade média do sistema para determinado ciclo de trabalho, mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Análise da indisponibilidade instantânea para a árvore de falha em uma usina nuclear.



Fonte: Oliva *et al.* (2018).

A planilha de baixo custo desenvolvida por Oliva *et al.* (2018) forneceu informações capazes de auxiliar efetivamente as tomadas de decisões para aumentar a confiabilidade da segurança nas instalações industriais, permitindo aos profissionais fazerem as análises com facilidade, caso contrário, seria necessário um investimento mais alto com algum software comercial mais específico e complexo.

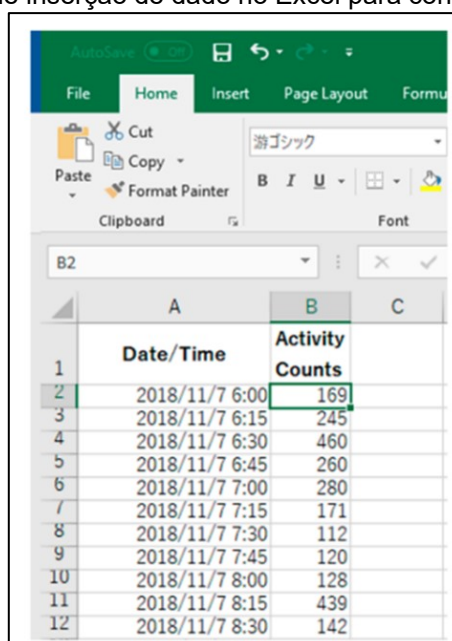
3.3 Visualização de actogramas

Nos mais diversos tipos de engenharias é possível encontrar casos relacionados com Cronobiologia, especificamente com actogramas, principalmente na Bioengenharia e Engenharia Genética.

Organismos vivos possuem eventos rítmicos, como o ritmo ultradiano e o ritmo circadiano. No ultradiano ocorrem atividades de alta frequência, com poucas horas de oscilações, atividades repetidas em segundos e milissegundos. No caso do circadiano são atividades em um ritmo com cerca de 24 horas. No ramo da Cronobiologia, ritmos circadianos são muitas das vezes representados através de actogramas (OIKE; OGAWA; OISHI, 2019).

Actogramas são representações de uma série temporal em gráficos com coordenadas cartesianas, sendo plotados os dados de tempo no eixo da abscissa e a variável de estudo no eixo da ordenada (CAMARGO, 2012). Foi exposto no trabalho de Oike, Ogawa e Oishi (2019) que os actogramas podem ser facilmente visualizados e operados no Excel, mostrando métodos rápidos e fáceis para a construção dos gráficos. O método simples apresentado, consistiu-se em inicialmente inserir uma sequência de dados de tempo na coluna A e da atividade na coluna B, conforme apresentado na Figura 11. Destaca-se que o trabalho original é em inglês e, por isso, as representações oriundas do Excel também estão em inglês.

Figura 11 - Exemplo de inserção de dado no Excel para construção de actogramas.



	A	B	C
	Date/Time	Activity Counts	
1			
2	2018/11/7 6:00	169	
3	2018/11/7 6:15	245	
4	2018/11/7 6:30	460	
5	2018/11/7 6:45	260	
6	2018/11/7 7:00	280	
7	2018/11/7 7:15	171	
8	2018/11/7 7:30	112	
9	2018/11/7 7:45	120	
10	2018/11/7 8:00	128	
11	2018/11/7 8:15	439	
12	2018/11/7 8:30	142	

Fonte: Oike, Ogawa e Oishi (2019).

Na primeira linha, uma sequência sobre cada dia para a entrada dos dados sobre o número da linha de ZT0 é criada, iniciando na coluna G. Insere-se o valor seis na célula G1 para o termo “2018/11/7 7:00 (ZT0 no dia 1)”. Na célula H1 a fórmula $=G1+24*4$ é colocada e a mesma é copiada e colada, arrastando a opção de preenchimento até o último dia. Na célula G4, usa-se a função INDIRETO, digitando $=INDIRETO("B"&G\$1+\$D4)$, para se referir a célula B6, e arrasta a caixa de preenchimento automático de modo a copiar a função e preencher todos os campos requeridos. Esse procedimento corresponde ao passo 4 apresentado em Oike *et al.* (2019) como é mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Exemplo do processamento dos dados no Excel para actogramas.

1) and 2)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Date/Time	Activity Counts				Row number of ZT0 data	6	=G1+24*4	
2	2018/11/7 6:00	169				Day	1	2	
3	2018/11/7 6:15	245							
4	2018/11/7 6:30	460		ZT	0	0:00			
5	2018/11/7 6:45	260			1	0:15			
6	2018/11/7 7:00	280			2	0:30			

3) and 4)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Date/Time	Activity Counts				Row number of ZT0 data	6	102	198	294
2	2018/11/7 6:00	169				Day	1	2	3	4
3	2018/11/7 6:15	245								
4	2018/11/7 6:30	460	0	ZT	0:00					
5	2018/11/7 6:45	260			1	0:15				
6	2018/11/7 7:00	280			2	0:30				
7	2018/11/7 7:15	171			3	0:45				

(theoretical references)

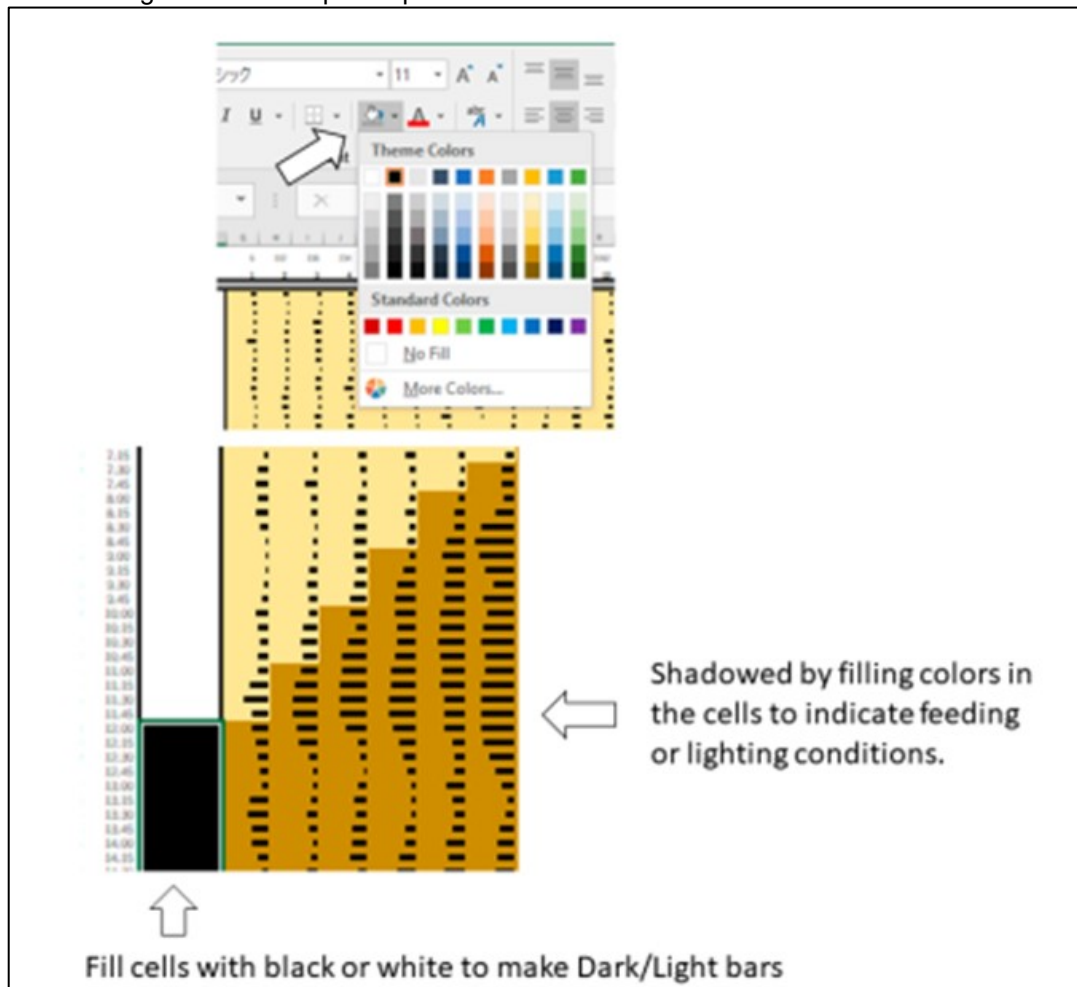
	G	H	I
number	6	102	198
data	1	2	3
y	=B6	=B102	=B198
	=B7	=B103	=B199
	=B8	=B104	=B200
	=B9	=B105	=B201
	=B10	=B106	=B202

Step 4. Line up every 48 hours of data in a column.
 An example method using “INDIRECT” function instead of copy & paste all the data;
 1) Put the row number of ZT0 data in the first row about each day.
 Put “6” in Cell G1 for “2018/11/7 7:00 (ZT0 in Day 1)”.
 2) Put “G1+24*4” in Cell H1 and copy the formula by dragging the fill-handle to the last day.
 3) Put “=INDIRECT(“B”&G\$1+\$D4)” in Cell G4 to refer the value of Cell B6.
 4) Next, drag and copy the formula to the end of actogram.

Fonte: Oike, Ogawa e Oishi (2019).

Em seguida, todos os valores gerados pela função INDIRETO são selecionados, clica-se em formatação condicional, em barras de dados e em mais regras. Na janela aberta, clica-se na opção mostrar barra somente, escolhe-se a opção “da direita para a esquerda” para direção da barra e clica-se em ok. São feitas sombras, preenchendo as células com cores para indicar claro e escuro ou condições de alimentação, mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Exemplo do processamento dos dados com barras no Excel.

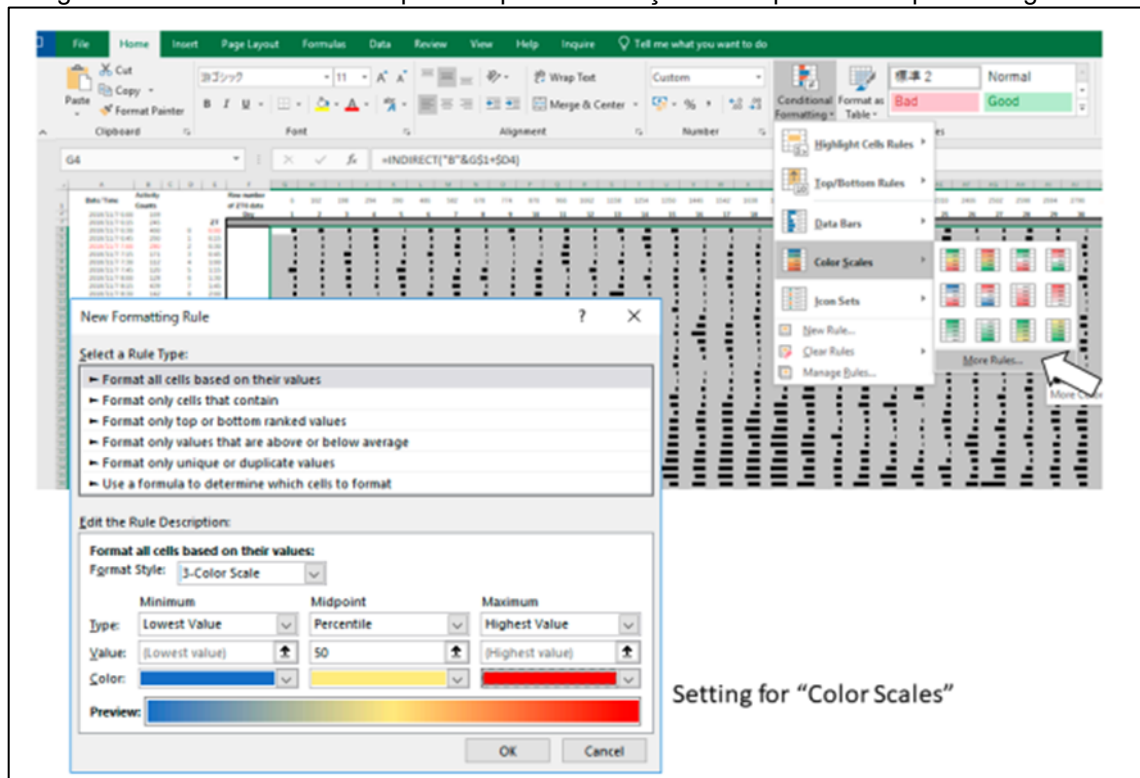


Fonte: Oike, Ogawa e Oishi (2019).

Para construir um actograma do tipo mapa de calor, seleciona-se todos os valores gerados pela função INDIRETO, clica-se em formatação condicional, em vez de selecionar barras de dados seleciona-se escala de cor e em mais regras. Na janela aberta, escolhe-se a opção “escala tricolor”, ajusta-se as cores que melhor representa o estudo feito e clica-se em ok. Reduz-se o tamanho e altera-se a cor da fonte de modo a minimizar a interferência visual da mesma no gráfico. O procedimento descrito é exemplificado na Figura 14.

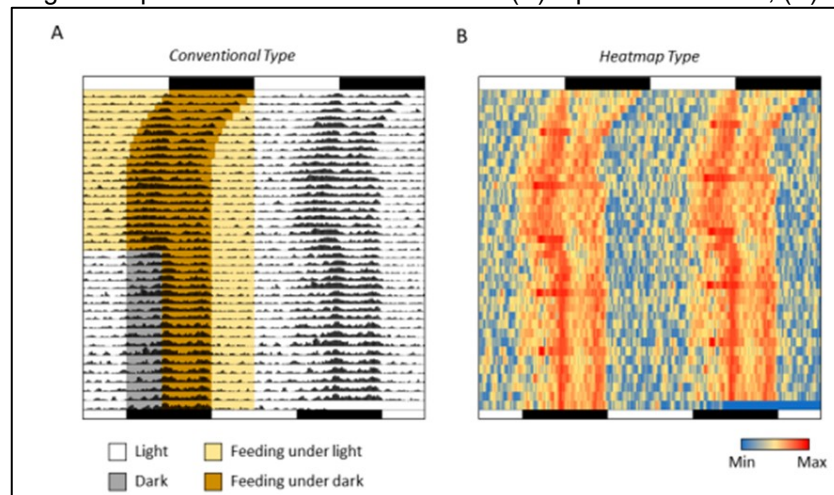
Por fim, copia-se o actograma com a função “Copiar como imagem”, cola-se dentro de um novo arquivo em algum software de desenho, por exemplo, o Microsoft PowerPoint, e edita-se o tamanho e orientação, ilustrado na Figura 15.

Figura 14 - Processamento na planilha para construção do mapa de calor para actogramas.



Fonte: Oike, Ogawa e Oishi (2019).

Figura 15 - Actogramas processados através do Excel. (A) Tipo convencional; (B) Mapa de calor.



Fonte: Oike, Ogawa e Oishi (2019).

O tipo de gráfico conhecido como actograma, muitas das vezes são usados para representar dados levantados de um monitoramento, possibilitando uma melhor compreensão visual desses dados. Com um nível de dificuldade baixíssimo, os gráficos podem ser construídos rapidamente no Excel. O procedimento apresentado no estudo de Oike, Ogawa e Oishi (2019) pode ser utilizado para os mais variados

tipos de dados periódicos, como temperatura corporal, nível de açúcar no sangue, padrão de sono, pressão sanguínea, expressões gênicas do relógio entre outros.

3.4 Resolução de treliças planas

Para uma boa compreensão de treliças, é importante ser capaz de determinar por meio de cálculos os esforços axiais e os deslocamentos, sendo o motivo de uma intensa busca por métodos que possam realizar de maneira prática o desenvolvimento dos cálculos.

O método dos elementos finitos consiste em dividir um problema complexo em pequenos problemas simples com o comportamento semelhante ao do problema inicial, a fim de analisar o problema complexo por meio de pequenas parcelas do mesmo (SORIANO; LIMA, 2003). Utilizando-se de macros (VBA), recursos gráficos e da facilidade do Excel, Oliveira *et al.* (2019) desenvolveram uma planilha para resolução de treliças planas através do método dos elementos finitos de barras. Primeiramente, inserem-se os dados de entrada, exemplo exibido na Figura 16.

Figura 16 - Exemplo de entrada de dados no Excel para resolução de treliças.

Coordenadas nodais						
Nó	1	2	3	4	5	6
X_coord	0,0	1,0	2,0	2,0	1,0	0,0
Y_coord	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0

Informações dos elementos									
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nó inicial	1	2	3	3	2	2	1	5	4
Nó final	2	3	4	5	5	6	6	6	5
A Sec	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
E	1,000E+06	1,000E+06	1,000E+06	1,000E+06	1,000E+06	1,000E+06	1,000E+06	1,000E+06	1,000E+06
PLOT	11,111	11,111	11,111	11,111	11,111	11,111	11,111	11,111	11,111
Escala	100								
Condições de apoio									
No.	1	6							
R_x	1	1							
R_y	1	1							
Carregamento									
Nó	1	2	3	4	5	6			
Px	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Py	0,00	0,00	0,00	-100	-50,00	0,00			

Fonte: Oliveira *et al.* (2019).

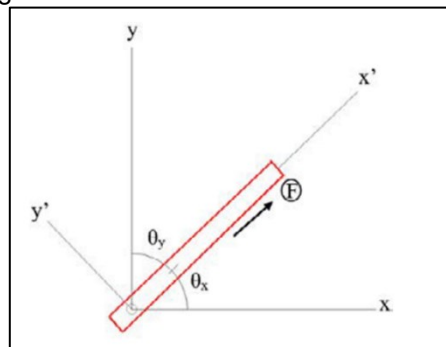
Os dados inseridos são as coordenadas nodais, os nós inicial e final de cada barra, a área da seção transversal e o módulo de elasticidade de cada barra, o tipo de apoio e sua coordenada, as forças nodais atuantes e em que nó estão aplicadas e a escala a ser utilizada na apresentação da estrutura deformada.

Faz-se uma série de equacionamentos, detalhada no estudo de Oliveira *et al.* (2019), para obter a equação que determina a matriz de rigidez local de cada barra, obtendo-se a Equação (1).

$$[K] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} \lambda_x^2 & \lambda_x \lambda_y & -\lambda_x^2 & -\lambda_x \lambda_y \\ \lambda_x \lambda_y & \lambda_y^2 & -\lambda_x \lambda_y & -\lambda_y^2 \\ \lambda_x^2 & -\lambda_x \lambda_y & \lambda_x^2 & \lambda_x \lambda_y \\ \lambda_x \lambda_y & -\lambda_y^2 & \lambda_x \lambda_y & \lambda_y^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

em que A é a área da seção transversal do elemento, E o módulo de elasticidade e L o seu comprimento. Os termos λ_x e λ_y são os cossenos dos ângulos (θ_x e θ_y) entre os sentidos positivos do sistema de eixo global e o eixo positivo x' do sistema local, conforme a Figura 17.

Figura 17 - Sistema de coordenadas locais.



Fonte: Oliveira *et al.* (2019).

Para calcular as forças axiais das barras faz-se uso da Equação (2).

$$\{q\} = [k]'[T]\{D\} \quad (2)$$

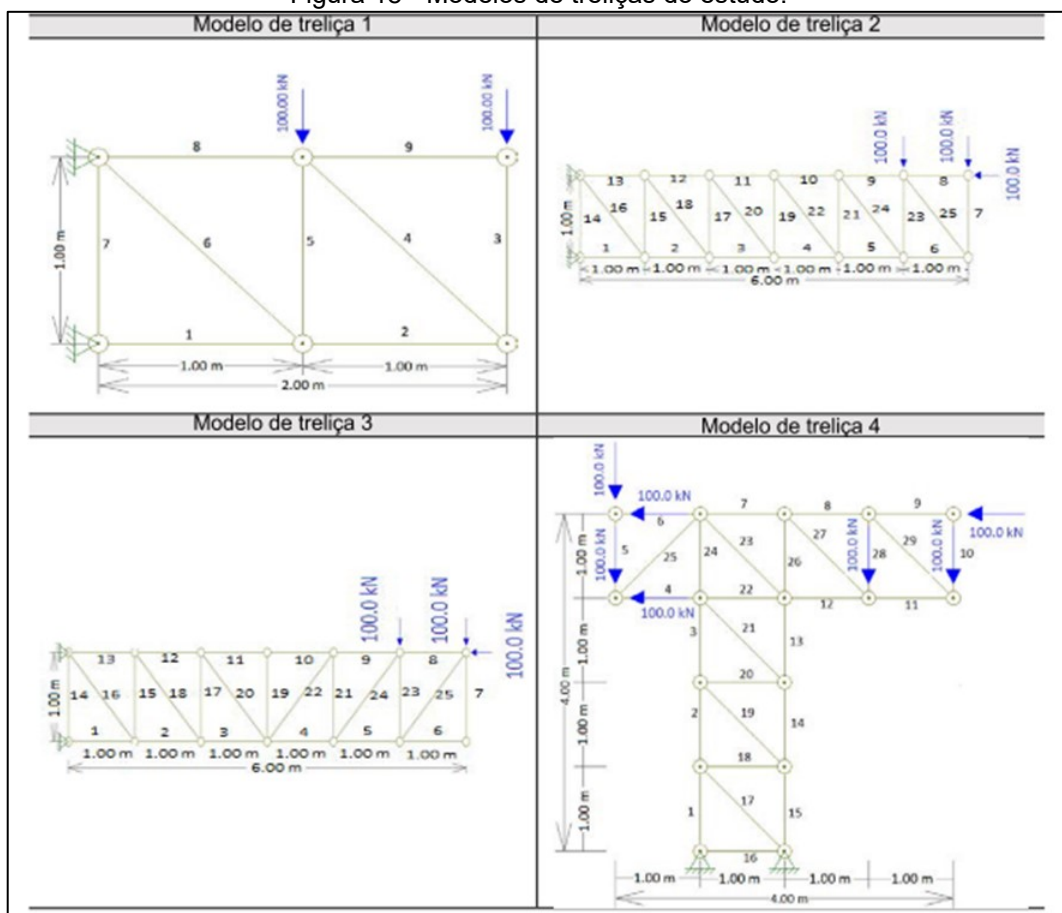
na qual $\{q\}$ corresponde ao vetor de carga nodal local de cada barra, $[k]'$ a matriz de rigidez elementar, $[T]$ a matriz de transformação de coordenadas globais para coordenadas locais e $\{D\}$ o vetor de deslocamentos globais. Deste modo, é capaz de classificar a força em tração ou compressão.

Com isso, é possível resolver o problema de treliças construindo a planilha através do procedimento apresentado a seguir, de modo simplificado, podendo ser consultado em detalhes no estudo de Oliveira *et al.* (2019):

- inserem-se os dados de entrada;
- determina-se a matriz de rigidez local de cada barra via Equação (1);
- determina-se a matriz global da estrutura;
- aplicam-se as condições de contorno;
- multiplica-se a matriz inversa da matriz global pelo vetor das forças nodais aplicadas;
- determinam-se os deslocamentos nodais;
- calculam-se os esforços axiais de cada barra utilizando a Equação (2);
- criam-se representações gráficas dos esforços axiais atuantes na estrutura, via VBA, e da estrutura deformada.

Oliveira *et al.* (2019) obtiveram através da planilha os resultados de quatro modelos de treliças, modeladas considerando que todas as barras são circulares, com área da seção de 10 cm², módulos de elasticidade de 1 MPa e que os nós previamente indicados sofreram esforços de 100 kN. Os modelos são representados na Figura 18.

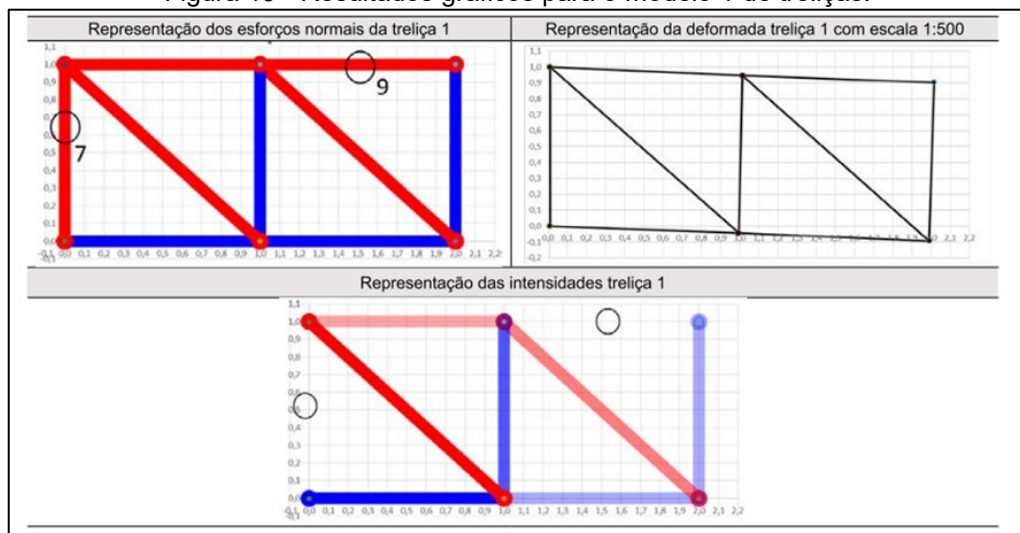
Figura 18 - Modelos de treliças do estudo.



Fonte: Oliveira *et al.* (2019).

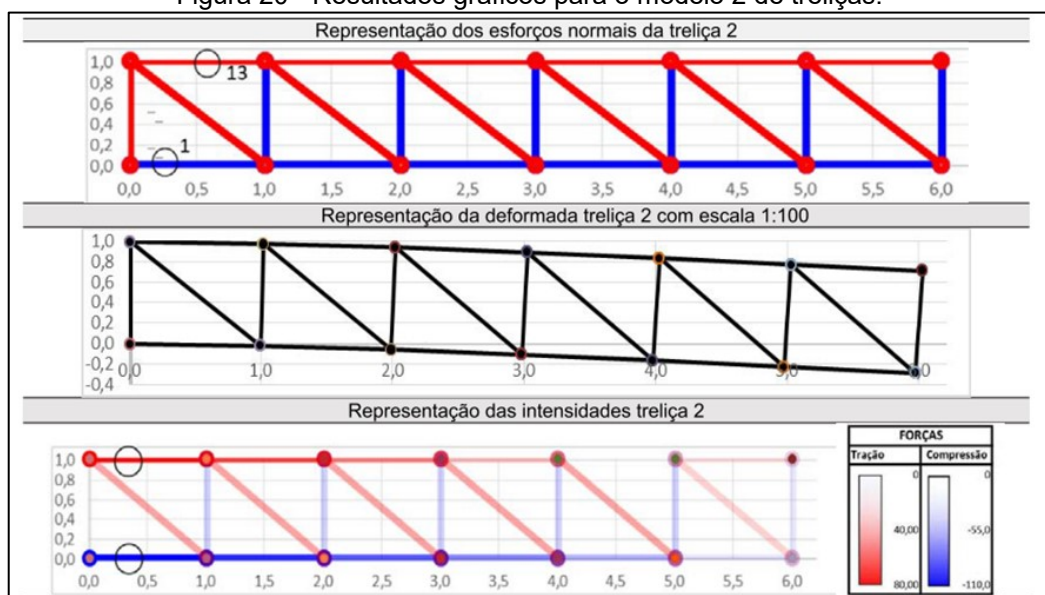
Segundo Oliveira *et al.* (2019), a planilha efetua os cálculos necessários de forças axiais nas barras e deslocamentos nodais das estruturas para o dimensionamento e fornece resultados satisfatórios, coincidindo com os valores que são esperados. Além de fornecer os resultados, a planilha representa as treliças através de gráficos, exibindo a intensidade das forças em cada barra e a estrutura deformada de acordo com escalas arbitradas. A representação da intensidade se dá com um gradiente de cores que expõe em vermelho a tração e em azul a compressão, sendo o esforço nulo a transparência total e o esforço máximo dado em vermelho ou azul absoluto, representado nas Figura 19, Figura 20, Figura 21 e Figura 22 para os modelos de treliça 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Figura 19 - Resultados gráficos para o modelo 1 de treliças.



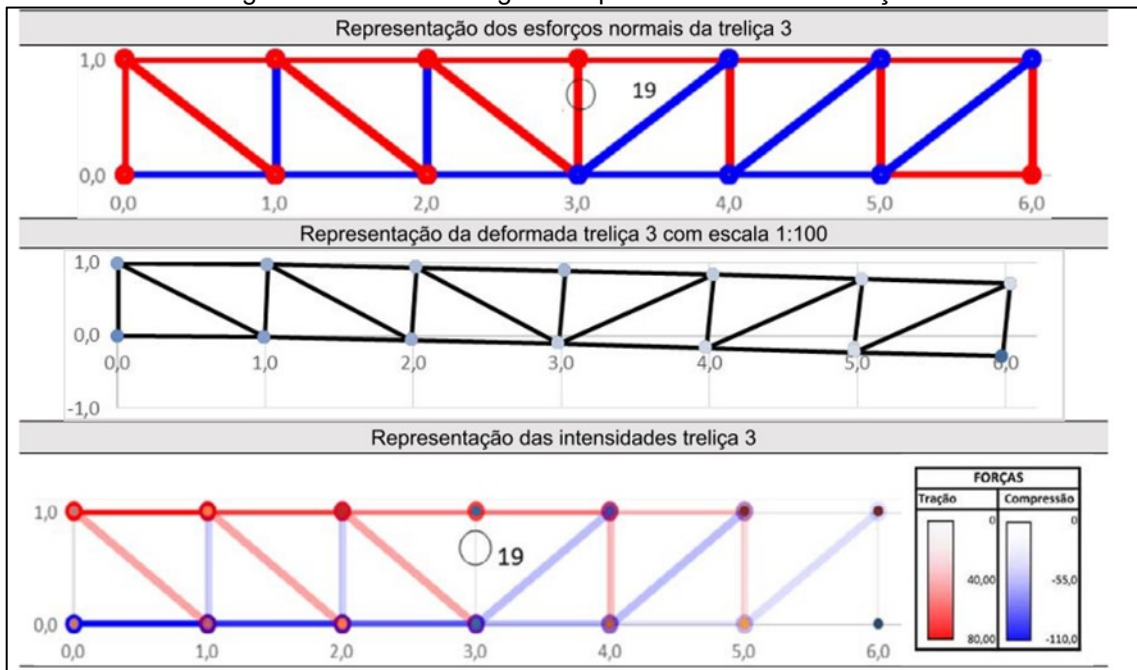
Fonte: Oliveira *et al.* (2019).

Figura 20 - Resultados gráficos para o modelo 2 de treliças.



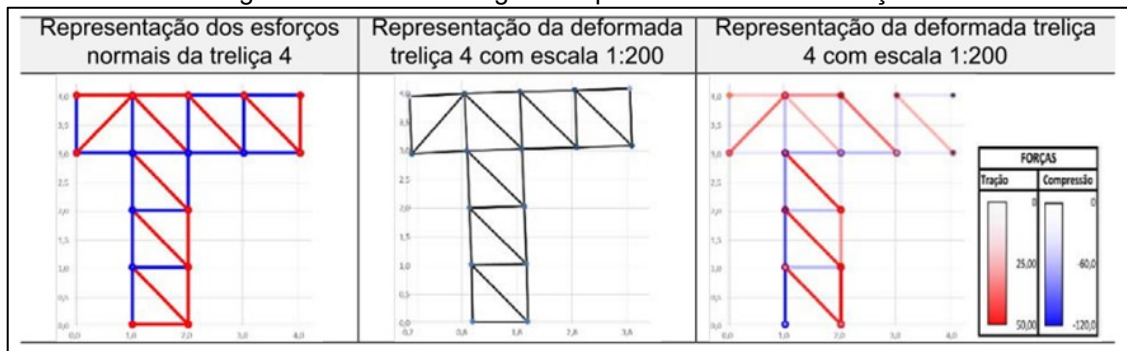
Fonte: Oliveira *et al.* (2019).

Figura 21 - Resultados gráficos para o modelo 3 de treliças.



Fonte: Oliveira *et al.* (2019).

Figura 22 - Resultados gráficos para o modelo 4 de treliças.



Fonte: Oliveira *et al.* (2019).

O uso desta planilha é capaz de fornecer os resultados quase idênticos com os que são obtidos a partir de métodos tradicionais comuns nas graduações de Engenharia Civil, facilitando assim, os cálculos, a didática e a análise pelo usuário, com uma proposta mais dinâmica e acessível, devido à facilidade de uso e alta disponibilidade do Excel no mercado.

3.5 Redução de erros em pesquisas sistemáticas

No estudo de Brunskill (2020) foi apresentado o desenvolvimento de uma planilha usando as funções CONCAT e UNIRTEXTO para auxiliar na solução do

problema que vem surgindo devido ao crescimento drástico de interesse e publicações de revisões sistemáticas. De acordo com Brunskill (2020), revisões sistemáticas obtêm melhores resultados quanto à qualidade quando bibliotecários participam como coautores, mas é complicado para estes participarem mais intensamente nas revisões, pois os mesmos possuem outras tarefas. Desenvolver a estratégia de busca e traduzir a busca exige um grande esforço e tempo, além de estarem sujeitos a erros manuais.

Para a construção da planilha de Brunskill (2020), primeiramente, divide-se a estratégia de pesquisa em conceitos e para cada um é identificado o vocabulário controlado e as palavras-chave. Essas informações são passadas para o Excel, separando os conceitos por colunas e cada termo em sua própria célula, como mostrado na Figura 23, para um exemplo de pesquisa que será feita no banco de dados PubMed. Destaca-se que o trabalho original é em inglês e, por isso, as representações oriundas do Excel também estão em inglês.

Figura 23 - Exemplo da separação dos por conceitos em colunas no Excel.

Concept #1: ADHD	Concept #2: Children	Concept #3: Physical Activity
MeSH headings	MeSH headings	MeSH headings
Attention Deficit Disorder with Hyperactivity	Child	Exercise
	Child, Preschool	Sports
	Adolescent	
Keywords	Keywords	Keywords
addh	youth	athletics
ADHD	adolescence	Cycling
adhs	adolescent	Exercise
Attention Deficit Disorder	adolescents	Fitness
Attention Deficit Hyperactivity Disorder	child	gym
	childhood	Physical activity
	children	Physical education
	kindergarten	Run
	kindergartners	Running
	paediatric	Sport
	pediatric	sports
	teen	
	teenagers	
	teens	

Fonte: Brunskill (2020).

Em seguida são adicionadas mais duas colunas para cada conceito. Na coluna ao lado dos termos, é aplicada a função CONCAT em cada célula para concatenar o termo referente entre aspas e a *tag* de pesquisa correspondente. No banco de dados PubMed usa-se a *tag* “mesh” para vocabulários controlados e “tiab” para pesquisas de palavras-chave no título e no resumo dos artigos. Os resultados da coluna em que

se aplica a concatenação são manualmente copiados e colados na terceira coluna, somente os valores, como mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Exemplo visual da distribuição das fórmulas nas células na planilha.

	A	B	C
1	Concept #1		
2	MeSH headings		
3	MeSH	Formula	pasted as values only
4	test	"test"[mesh]	
6	Attention Deficit Disorder with Hyperactivity	"Attention Deficit D	"Attention Deficit Disorder with Hyperactivity"[mesh]
7		""[mesh]	
8		""[mesh]	
9		""[mesh]	
10		""[mesh]	
11		""[mesh]	
12		""[mesh]	
13		""[mesh]	
14		""[mesh]	
15		""[mesh]	
16		""[mesh]	
17	Keywords		
18	Term	Formula	Formula
19	test	"test"[tiab]	"test"[tiab]
22	addh	"addh"[tiab]	"addh"[tiab]
23	ADHD	"ADHD"[tiab]	"ADHD"[tiab]
24	adhs	"adhs"[tiab]	"adhs"[tiab]
25	Attention Deficit Disorder	"Attention Deficit D	"Attention Deficit Disorder"[tiab]
26	Attention Deficit Hyperac	"Attention Deficit H	"Attention Deficit Hyperactivity Disorder"[tiab]

Fonte: Brunskill (2020).

Em seguida, a função UNIRTEXTO é utilizada para a criação de uma *string* de pesquisa para cada conceito, adicionando o operador booleano "OR" entre os termos e ignorando as células vazias. Após criar as *strings* de pesquisa para cada conceito, aplica-se novamente a função CONCAT para unir as *strings*, inserindo cada uma entre parênteses e separando as mesmas pelo operador "AND". Isso cria uma *string* de linha única, apresentado na Figura 25, podendo ser utilizada no banco de dados.

Figura 25 - Exemplos da criação de *strings* por conceito e a *string* única.

	Formula
Textjoin for Concept #1	"Attention Deficit Disorder with Hyperactivity"[mesh] OR "addh"[tiab] OR "ADHD"[tiab] OR "adhs"[tiab] OR "Atten
Textjoin for Concept #2	"Child"[mesh] OR "Child, Preschool"[mesh] OR "Adolescent"[mesh] OR "youth"[tiab] OR "adolescence"[tiab] OR "
Textjoin for Concept #3	"Exercise"[mesh] OR "Sports"[mesh] OR "athletics"[tiab] OR "Cycling"[tiab] OR "Exercise"[tiab] OR "Fitness"[tiab]
Formula putting it all together	("Attention Deficit Disorder with Hyperactivity"[mesh] OR "addh"[tiab] OR "ADHD"[tiab] OR "adhs"[tiab] OR "Atter
Paste using values only	("Attention Deficit Disorder with Hyperactivity"[mesh] OR "addh"[tiab] OR "ADHD"[tiab] OR "adhs"[tiab] OR "Atte Disorder"[tiab] OR "Attention Deficit Hyperactivity Disorder"[tiab]) AND ("Child"[mesh] OR "Child, Preschool" "Adolescent"[mesh] OR "youth"[tiab] OR "adolescence"[tiab] OR "adolescent"[tiab] OR "adolescents"[tiab] OR "c "childhood"[tiab] OR "children"[tiab] OR "kindergarten "[tiab] OR "kindergartners"[tiab] OR "paediatric"[ti "pediatric"[tiab] OR "teen"[tiab] OR "teenagers"[tiab] OR "teens"[tiab]) AND ("Exercise"[mesh] OR "Sports"[ti "athletics"[tiab] OR "Cycling"[tiab] OR "Exercise"[tiab] OR "Fitness"[tiab] OR "gym"[tiab] OR "Physical activity "Physical education"[tiab] OR "Run"[tiab] OR "Running"[tiab] OR "Sport"[tiab] OR "sports"[tiab])

Fonte: Brunskill (2020).

A planilha proposta por Brunskill (2020) é capaz de reduzir erros manuais e o tempo gasto no processo de compilação, e pode ser personalizada pelos bibliotecários com suas preferências de pesquisa e fluxos de trabalho existentes.

3.6 Aplicações na engenharia química

Assim como nas áreas das engenharias apresentadas anteriormente, o Excel tem a sua contribuição na área da Engenharia Química. A seguir, alguns dos muitos exemplos encontrados na literatura da contribuição do Excel na área são apresentados.

3.6.1 Equações integradas de Michaelis-Menten

Para a análise cinética realizada em enzimas, a teoria de Michaelis-Menten comprovou ser uma importante perspectiva sobre o assunto, definindo a relação entre as velocidades iniciais e as concentrações de substrato. As principais vantagens de utilizar as equações integradas de Michaelis-Menten são: a eliminação da necessidade de diferenciar os dados para obter a velocidade; mais informações podem ser obtidas em cada experimento com economia de tempo e reagentes; possibilita determinar as constantes cinéticas de forma mais precisa; a adição inicial

do produto inibidor final pode ser eliminado e o valor da constante de dissociação pode ser avaliado simultaneamente em circunstâncias que não requerem a adição separada dos produtos da reação; a possibilidade de estimar a concentração inicial de substrato; e determinar as constantes cinéticas sem o conhecimento da concentração exata de substrato (BEZERRA; FRAGA; DIAS, 2013).

Quando a enzima demonstra perda de atividade sob as condições de ensaio escolhidas, ocorre uma importante limitação prática na análise da curva de progresso, a qual através de uma regressão, apresenta valores de velocidades iniciais para diferentes concentrações de substrato. Bezerra, Fraga e Dias (2013) propuseram no seu estudo uma planilha eletrônica construída no Excel para resolver a equação integrada de Michaelis-Menten, por meio de uma regressão não-linear calculada pelo suplemento *Solver*. A equação integrada de Michaelis-Menten é expressa pela Equação (3).

$$v = \frac{V[St]}{K_m(1 + ([P]/K_{ic})) + [St](1 + ([P]/K_{iu}))} \quad (3)$$

em que K_m é a constante de Michaelis, K_{ic} é a constante de dissociação inibidora da enzima-inibidora, K_{iu} é a constante de dissociação inibidora das enzimas-substrato-inibidor complexas, V é a velocidade máxima de reação, v é a velocidade inicial da reação, $[P]$ é a concentração do inibidor e $[St]$ é a concentração de substrato no tempo t . Com base na equação de Michaelis-Menten, fez-se uma manipulação de equações, apresentadas detalhadamente no trabalho de Bezerra, Fraga e Dias (2013), afim de obter a equação conhecida como modelo de inibição mista (MI), expressa pela Equação (4).

$$t = -\frac{1}{v} \left\{ K_m \left(\frac{[So]}{K_{ic}} + \frac{[Po]}{K_{ic}} + 1 \right) \ln \frac{[St]}{[So]} + \left(1 - \frac{K_m}{K_{ic}} + \frac{[So]}{K_{iu}} + \frac{[Po]}{K_{iu}} \right) ([St] - [So]) + \left(-\frac{1}{2K_{iu}} \right) ([St]^2 - [So]^2) \right\} \quad (4)$$

sendo que t é o tempo, $[So]$ é a concentração inicial de substrato e $[Po]$ é a concentração inicial de inibidor. Podendo ser simplificada para a expressão de outros modelos, como a inibição competitiva (CI), inibição incompetitiva (UCI), inibição não competitiva (NCI) ou sem inibição (WI).

Para construir a planilha de Bezerra, Fraga e Dias (2013), primeiro inserem-se em uma planilha em branco os dados de entrada, da mesma forma como é mostrada

na Figura 26. Destaca-se que o trabalho original é em inglês e, por isso, as representações oriundas do Excel também estão em inglês.

Figura 26 - Modelo de planilha para determinar as constantes cinéticas.

		D8		fx		=((B8-F8)+\$B\$1*LN(E8/(E8-(B8-F8))))/(G8*\$B\$2)		
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Km=	1						
2	k3=	1						
3						SSE=	0	
4								
5								
6		Product	Time	Calculated Substrate	Inhibitor	Protein		
7		µM	(s)	time (s)	µM	µg/2.75 ml	Square	
8		0	0	0	25	9.5	0	
9		0.566	10		25	9.5		
10		1.154	20		25	9.5		
11		1.704	30		25	9.5		
12		2.281	40		25	9.5		
13		2.709	50		25	9.5		
14		3.124	60		25	9.5		
15								
16		0	0		34.7	9.5		
17		0.634	10		34.7	9.5		
18		1.296	20		34.7	9.5		
19		2.01	30		34.7	9.5		
20		2.639	40		34.7	9.5		

Fonte: Bezerra, Fraga e Dias (2013).

As células B1 e B2 são os "valores iniciais" para Km e para constante da taxa k3, respectivamente, na qual em ambas digita-se o valor um. Para o cálculo do tempo insere-se na célula D8 a fórmula de tempo fornecido na Tabela 2 para a equação de Michaelis-Menten integrada considerando o modelo WI. Copia-se a célula para todas as outras células até D126. Digita-se nas células F8 até F126 a concentração do inibidor (0 ou 5 µM) e nas células E8 até E126 a concentração de substrato. Então, digita-se na célula H8 o quadrado da diferença, expresso pela fórmula **=POTÊNCIA(C8-D8;2)** e copia-se até a célula H126. Em seguida, digita-se na célula G3 a fórmula **=SOMA(H8:H126)**.

Tabela 2 - Equações de diferentes modelos para serem usadas no Excel.

Modelos	Equações para Excel (Coluna D)
WI	Tempo calculado = $((B8 - F8) + \$B\$1 \times \text{LN}(E8/(E8 - (B8 - F8))))/(G8 \times \$B\$2)$ Assume: $K_m = \$B\1 ; $k_3 = \$B\2
CI	Tempo calculado = $((1 - \$B\$1/\$B\$2) \times (B8 - F8) + \$B\$1 \times (E8/\$B\$2 + F8/\$B\$2 + 1) \times \text{LN}(E8/(E8 - (B8 - F8)))) \times 1/(G8 \times \$B\$3)$ Assume: $K_m = \$B\1 ; $K_{ic} = \$B\2 ; $k_3 = \$B\3
NCI	$M8 = \$B\$1 \times ((F8/\$B\$2) + E8/\$B\$2 + 1)$ $N8 = -\$B\$1/\$B\$2 + 1 + F8/\$B\$2 + E8/\$B\2 $O8 = -1/(2 \times \$B\$2)$ $L8 = (E8 - (B8 - F8))$ Tempo calculado = $(M8 \times \text{LN}(L8/E8) + N8 \times (L8 - E8) + O8 \times (L8^2 - E8^2)) \times (-1/(G8 \times \$B\$3))$ Assume: $K_m = \$B\1 ; $K_{ic} = K_{iu} = \$B\2 ; $k_3 = \$B\3
UCI	$L8 = (E8 - (B8 - F8))$ Tempo calculado = $(\$B\$1 \times \text{LN}(E8/L8) - (1 + F8/\$B\$2 + E8/\$B\$2) \times (L8 - E8) + (L8^2 - E8^2)/(2 \times \$B\$2)) \times (1/(G8 \times \$B\$3))$ Assume: $K_m = \$B\1 ; $K_{iu} = \$B\2 ; $k_3 = \$B\3
MI	$M8 = \$B\$1 \times (1 + F8/\$B\$2 + E8/\$B\$2)$ $N8 = (-\$B\$1/\$B\$2) + 1 + (F8/\$B\$4) + (E8/\$B\$4)$ $O8 = -1/(2 \times \$B\$4)$ $L8 = (E8 - (B8 - F8))$ Tempo calculado = $(M8 \times \text{LN}(L8/E8) + N8 \times (L8 - E8) + O8 \times (L8^2 - E8^2)) \times (-1/(G8 \times \$B\$3))$ Assume: $K_m = \$B\1 ; $K_{ic} = \$B\2 ; $k_3 = \$B\3 ; $K_{iu} = \$B\4

Fonte: adaptado de Bezerra, Fraga e Dias (2013).

Em seguida, abre-se a janela do *Solver*, e dentro da mesma, define-se a célula G3 como função objetivo, seleciona-se as células B1 e B2 como células variáveis, marca-se a caixa MIN na opção “Para:”, desmarca-se a caixa tornar variáveis irrestritas não negativas e clica-se em resolver. Repete o *Solver* até as constantes cinéticas e a soma do erro quadrado estabilizarem.

Copia-se a planilha do modelo WI para outra pasta de trabalho do Excel e altera-se as fórmulas da coluna D para outro modelo contido na Tabela 2, a qual para os modelos mais complexos instrui a inserção de mais células para os cálculos. Salientando que é importante fazer boas estimativas de valores iniciais para as constantes cinéticas, caso contrário pode-se apresentar falhas no *Solver*. É feita com esse procedimento uma planilha para cada modelo.

A planilha possibilita realizar os cálculos de uma forma prática para resolver a regressão não-linear para modelos da equação integrada de Michaelis-Menten. Além de que podem ser feitas complementações na planilha para facilitar a análise do procedimento, como criar ilustrações gráficas de modo a observar o desenvolver da convergência da soma dos quadrados.

3.6.2 Destilação em colunas de multiestágios

Uma das operações unitárias fundamental na área da engenharia química é a destilação, sendo a destilação em multiestágios um método amplamente utilizado industrialmente para separar misturas químicas, principalmente misturas binárias. É considerado como o procedimento mais simples e talvez o mais instrutivo para projetos de colunas binárias o método McCabe-Thiele (DONGARE *et al.*, 2016). O método McCabe-Thiele demonstra graficamente conceitos envolvidos na operação de uma coluna de destilação, por exemplo, o número de estágios e a taxa de refluxo mínimo, sendo um método fundamental no ensino da destilação (GOSSAGE, 2015).

Devido à dificuldade, principalmente em relação ao tempo gasto para desenvolver o método de McCabe-Thiele, ambos Dongare *et al.* (2016) e Gossage (2015), como muitos outros encontrados na literatura, apresentaram estudos sobre o desenvolvimento de planilhas eletrônicas em Excel para automatizar o método McCabe-Thiele, realizando uma boa aproximação dos resultados de modo muito mais rápido e prático. No presente trabalho é abordado um pouco mais sobre a planilha de Gossage (2015), a qual foi utilizado VBA, de modo a mostrar como o Excel pode ser, quando bem usado, uma poderosa ferramenta nas engenharias.

Para construir a planilha do trabalho de Gossage (2015), inicialmente abre-se a janela de VBA clicando em *Visual Basic* na guia desenvolvedor do Excel e insere-se o código exatamente como é apresentado no ANEXO B, criando as funções FXBS e FXCubic. As limitações e todos os passos do procedimento descrito a seguir para a construção da planilha podem ser consultados em detalhes no trabalho de Gossage (2015).

Dando sequência ao desenvolvimento do procedimento, adiciona-se os valores das entradas, a faixa (*range*) e as condições dos valores de saída para o algoritmo em VBA, como mostrado na Figura 27. Destaca-se que o trabalho original é em inglês e, por isso, as representações oriundas do Excel também estão em inglês.

Figura 27 - Inserção dos dados de entrada na planilha para destilação multiestágios.

	A	B	C	D
1	Inputs		Range	
2	zf	0.1	$x_b < z_f < x_d$	
3	q	0.8	$> -RR$	
4	xd	0.85	$z_f < x_d < 1$	
5	xb	0.01	$0 < x_b < z_f$	
6	RR	3		
7	η	1	$0 < \eta \leq 1$	
8				
9				
10	Outputs			
11	Azeo.		if present, else 0	
12	xf		Intersection of feed	
13	yf		line with op lines	
14	Stages		$N \leq 50$	
15	Nf		Feed Stage	

Fonte: Gossage (2015).

As variáveis, z_f é fração molar do componente A da mistura, q é o calor necessário para vaporizar um mol da alimentação nas condições de entrada dividido pelo calor latente molar de vaporização da alimentação, x_d é a fração molar de líquido do componente A no destilado, x_b é a fração molar de líquido do componente A na base da coluna, RR é a razão de refluxo e η é a eficiência. Já nas células “*outputs*”, “Azeo.” é o azeótropo, x_f é a fração molar de líquido do componente A na alimentação, y_f é a fração molar de vapor do componente A na alimentação e N_f o estágio de alimentação.

Destacando-se que a variável q recebe o valor 0 quando a alimentação é um vapor saturado, 1 quando a alimentação é um líquido saturado, um valor entre 0 e 1 ($0 < q < 1$) quando a alimentação é uma mistura saturada de líquido-vapor, um valor menor que 0 ($q < 0$) quando a alimentação é vapor superaquecido e maior que 1 ($q > 1$) quando a alimentação é um líquido sub-resfriado.

Em seguida, nomeia-se a célula B2 com o nome “ z_f ”. Também nomeiam-se as outras variáveis na coluna B, a B3 com o nome “ q ”, B4 com “ x_d ”, B5 com “ x_b ”, B6 com “ RR ”, B7 com “ η ”, B11 com “Azeo.”, B12 com “ x_f ”, B13 com “ y_f ”, B14 com “ N ” e B15 com “ N_f ”. Inserem-se os títulos nas células Q1 a S2 como mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Células com os títulos para os dados de equilíbrio.

	Q	R	S
1		Equilibrium Data	
2	Point #	x	y

Fonte: Gossage (2015).

Na célula Q3 insere-se o valor 1, na célula Q4 insere-se a fórmula `=SE(R4<>"";Q3+1;"")` e utiliza-se a alça de preenchimento até a célula Q33. Preenche-se as células da R e S com os valores de x e y, como os da Tabela 3. Após, seleciona-se da célula R3 até R20 e nomeia-se a caixa com "xdata" e faz-se o mesmo da S3 até S20 com o nome "ydata".

Tabela 3 - Dados experimentais para uma mistura etanol/água.

#	X	Y	T [K]
1	0,0010	0,0047	373,15
2	0,0061	0,0721	371,75
3	0,0145	0,1539	369,65
4	0,0237	0,2301	367,35
5	0,0310	0,2851	365,65
6	0,0490	0,3559	362,45
7	0,0652	0,4181	361,45
8	0,0968	0,4534	359,55
9	0,1394	0,5314	357,55
10	0,3261	0,6047	354,65
11	0,4635	0,6518	353,35
12	0,5413	0,6751	352,65
13	0,6856	0,7451	351,75
14	0,7760	0,8005	351,55
15	0,8403	0,8457	351,35
16	0,9037	0,9010	351,45
17	0,9725	0,9721	351,55
18	0,9804	0,9774	351,65

Fonte: Gossage (2015).

Inserese a fórmula **=FXBS(xdata;ydata;-1)** na célula B11 para encontrar o azeótropo. Na célula B12 inserese a fórmula **=SE(q=1;zf;(xd/(1+RR)+zf/(q-1))/(q/(q-1)-RR/(1+RR)))** para calcular o valor de xf e a fórmula **=(xd+xf*RR)/(1+RR)** na célula B13 para calcular o valor de yf. Na sequência do procedimento, a célula B14 recebe a fórmula **=MÁXIMO(A21:A71)-1+(PROCV(MÁXIMO(A21:A71)-1;(A21:B71);2)-xb)/((PROCV(MÁXIMO(A21:A71)-1;(A21:B71);2)-PROCV(MÁXIMO(A21:A71);(A21:B71);2)))**. A fórmula inserida na célula B15 para identificar o valor o Nf, é **=ÍNDICE(A21:B71;CORRESP(xf;B21:B71;-1);1)+1**.

No próximo passo, os títulos para os dados dos estágios são inseridos nas linhas 19 e 20 da planilha, como mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Células com as entradas dos títulos para os estágios.

	A	B	C
19	Stages		
20	#	x	y

Fonte: Gossage (2015).

Na célula A21 atribui-se o valor 0 e na B21 e C21 a fórmula **=xd**. As células A22, B22 e C22 são preenchidas com as fórmulas indicadas na Tabela 4, então arrasta-se o preenchimento das respectivas fórmulas até as células A71, B71 e C71.

Tabela 4 - Fórmulas inseridas na planilha de destilação em multiestágios, nas colunas A, B e C.

Célula	Fórmula
A22	=SE(A21<>"";(SE(C21>xb;A21+1;"");""))
B22	=SE(A22<>"";(B21-eta*(B21-FXBS(xdata;ydata;C21)));"")
C22	= SE(A22<>"";(SE(B22>xf;(xd+B22*RR)/(1+RR);((yf-xb)/(xf-xb))*(B22-xb)+xb)));"")

Fonte: elaborada pelo autor (2021).

Digita-se os seguintes títulos, um por coluna, na linha 19, começando na célula D19 e finalizando na célula P19: #, x, 45° *line*, *Rect line*, *Strip line*, *Feed line*, *Eq line*, *Stages*, *Distillate*, *Feed*, *Bottoms*, *Orig Data* e *Azeotrope*. Na célula L20 entra-se com valor zero e na L21, E20 e E21 entra-se com a fórmula **=xd**. A Tabela 5 indica o que é inserido nas células nos próximos passos do procedimento.

Tabela 5 - Fórmulas inseridas para construção da planilha de destilação em multiestágios. Parte 1.

Célula	Inseriu-se
L20, M22, N24, F26, E26, E34	0
E27, F27	1
E22, E23, M23, E32 e I32	=zf
E29, E30	=xf
G29, H30	=yf
L21, E20, E21, E28, G28	=xd
E24, E25, N25, E31 e H31	=xb
E33	=SE(q=1;xf;SE(E((yf-1)/xf<q/(q-1);q/(q-1)<1);0;xf+(q-1)*(1-yf)/q))
I33	=SE(q=1;1;SE(E((yf-1)/xf<q/(q-1);q/(q-1)<1);yf-q*xf/(q-1);1))
J34	=FXBS(ydata;xdata;E34)
E35	=E34+0,005
J35	=FXBS(ydata;xdata;E35)

Fonte: elaborada pelo autor (2021).

Copia-se as células E35:J35 até a célula J234, como a mesma retorna “#VALOR!”, manualmente insere-se o valor um na célula E234, porque devido ao erro de arredondamento pode-se resultar em um valor ligeiramente maior do que um. Na célula D235 insere-se **=A21**. A Tabela 6 indica os próximos três passos.

Tabela 6 - Fórmulas inseridas para construção da planilha de destilação em multiestágios. Parte 2.

Célula	Inseriu-se
E235	=SE(D235<>"";PROCV(D235;\$A\$21:\$C\$71;2);0)
K235, K236	=SE(D235<>"";SE(D235<N;PROCV(D235;\$A\$21:\$C\$71;3);E235);0)
E236	=SE(D235<>"";PROCV(D235+1;\$A\$21:\$C\$71;2);0)
D237	=SE(D235<>"";(SE(D235<MÁXIMO(\$A\$21:\$A\$71);D235+1;""));"")

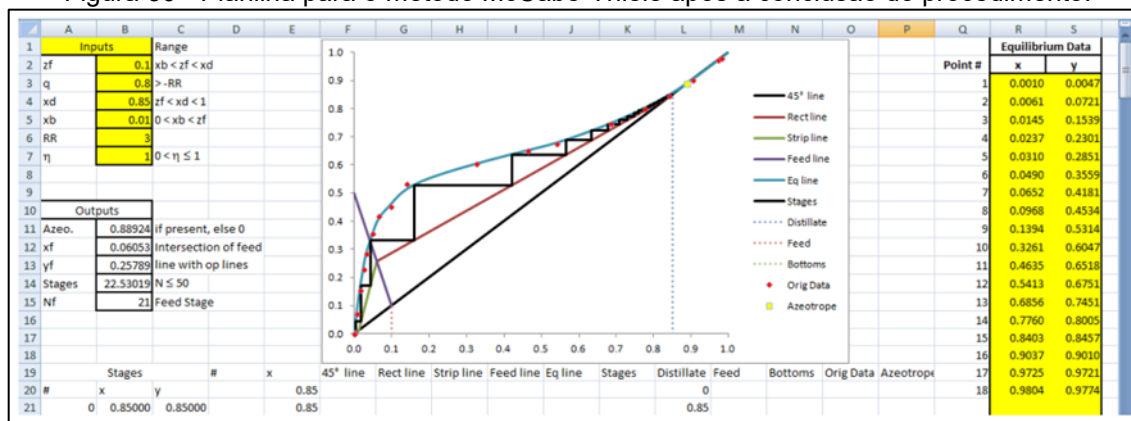
Fonte: elaborada pelo autor (2021).

Seleciona-se as células E235:K236, copia, clica na célula E237 e cola. Em seguida, arrasta-se para o preenchimento das células D237:K238 até K336. Na célula E337 atribui-se **=R3** e na célula O337 a fórmula **=SE(ÉCÉL.VAZIA(S3);"";S3)**. Então, arrasta para preenchimento das células D337:O337 até O368. A fórmula **=Azeo** é posta nas células E369 e P369.

Com os passos anteriores realizados, o Excel é capaz de desenhar o diagrama McCabe-Thiele seguindo as próximas etapas. Seleciona-se as células E19:P369 e

clica-se em inserir gráfico de dispersão com linhas retas. Finalizando, além de aplicar um redimensionamento, formata-se os eixos, grades, linhas e marcadores do gráfico de modo a propiciar uma melhor visualização do gráfico gerado pelo procedimento descrito em Gossage (2015), de modo a ser exibido como na Figura 30.

Figura 30 - Planilha para o método McCabe-Thiele após a conclusão do procedimento.



Fonte: Gossage (2015).

Nos resultados de saída calculados pela planilha obteve-se um valor de aproximadamente 23 estágios, o ideal para alimentação sendo o estágio 21, azeótropo com cerca de 0,889 em fração molar do componente A, a fração molar de líquido e vapor de A na alimentação em torno de 0,0605 e 0,2579 respectivamente. Gossage (2015) também mostrou que a planilha pode fazer algumas estimativas de variáveis através da ferramenta *Solver* do Excel, por exemplo, atribuir um valor objetivo para a quantidade de estágios, adotar a célula com o valor da razão de refluxo como variável e resolver, o *Solver* fornece o valor da taxa de refluxo para aquele determinado número de estágios.

Destaca-se que no procedimento de Gossage (2015) são identificadas algumas pequenas inconsistências nas inserções das células, sendo que para correção, o autor da presente revisão faz-se algumas modificações nas inserções para obter os resultados desejados do trabalho estudado.

Com esse exemplo, fica-se evidente o quanto o bom uso das ferramentas disponíveis no Excel e suas combinações podem agregar na prática e ensino da engenharia química, mostrando ser um poderoso software de baixo custo para resolver problemas com alto nível de dificuldade ou muito tempo gasto de uma forma simples e rápida. O presente exemplo, por meio de funções e o VBA do Excel ilustra graficamente o processo de McCabe-Thiele estimando as informações sobre os

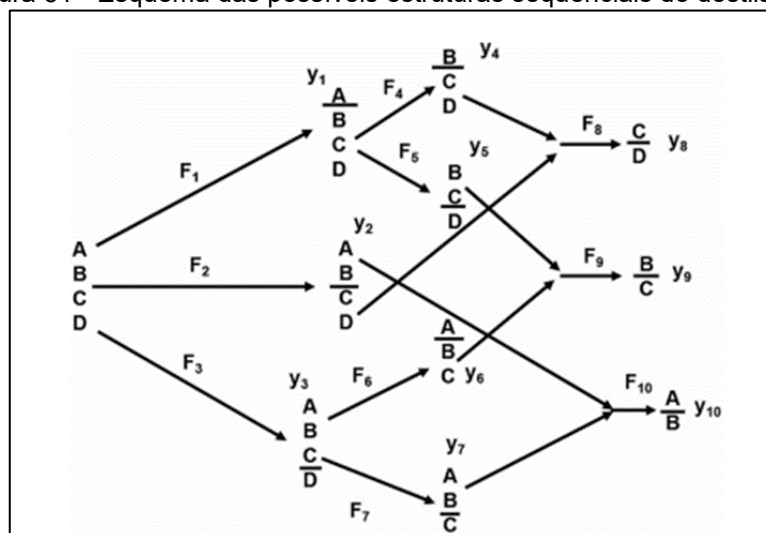
estágios, azeótropo as frações molares do componente A na alimentação, dados a pureza, os dados de equilíbrio, as condições de alimentação, a base e topo desejados e a taxa de refluxo.

3.6.3 Otimização em sequências de destilação

Uma das operações de extrema importância para separação e mistura na área da engenharia química é a destilação. Os mais diversos casos de otimização para essa operação tendem a envolver muitas variáveis, dificultando a execução dos cálculos por meios manuais, exigindo a utilização de softwares com linguagens de programação matemática. O trabalho de Briones *et al.* (2020) mostra que não é sempre necessário recorrer a softwares complexos e de alto custo, apresentando uma planilha eletrônica do Excel, ensinada para alunos de mestrado em engenharia química na *Juan Carlos University e Autónoma University de Madrid*, para solucionar problemas de otimização de sequências de destilação. É apresentado um problema que consiste na determinação de uma sequência de destilação otimizada para uma mistura com 4 componentes, a fim de separá-los individualmente. A determinação da melhor destilação é obtida através de uma função objetivo, a qual leva-se também em consideração os balanços de massa e restrições lógicas do caso.

A seguir, é apresentado um desenvolvimento superficial do procedimento adotado por Briones *et al.* (2020) para a construção da planilha. O primeiro passo é identificar e estruturar todos os caminhos de destilação possíveis, mostrado na Figura 31.

Figura 31 - Esquema das possíveis estruturas sequenciais de destilação.



Fonte: Briones *et al.* (2020).

Na qual para cada coluna k , é associado um fluxo molar de entrada F_k e uma variável binária y_k , a qual receberá o valor de 1 se a coluna correspondente for escolhida e receberá o valor de 0 se não for escolhida. Destaca-se que o trabalho original é em inglês e, por isso, as representações oriundas do Excel também estão em inglês.

A equação objetivo a ser otimizada para a solução do problema, formulada matematicamente para requerido processo, é a Equação (5):

$$C = \sum_{k=1}^{10} (\alpha_k y_k + \beta_k F_k) + (30 + 1,5) \sum_{k=1}^{10} Q_k \quad (5)$$

em que C representa o custo total, α_k é o custo fixo da coluna escolhida, β_k é o custo variável da coluna, Q_k representa o calor total do condensador e refeedor e os valores 30 e 1,5 são, respectivamente, os custos do vapor e da água de resfriamento.

O termo Q_k para condensadores e refeedores pode ser calculado pela Equação (6):

$$Q_k = K_k F_k \quad (6)$$

sendo que K_k é uma constante determinada para cada coluna por meio de cálculos realizados através da Equação (7):

$$K_k = (L_k + D_k) \frac{\lambda_k}{F_k} \quad (7)$$

na qual λ_k é o calor latente da mistura alimentada no condensador, L_k é o termo para o líquido que retorna para a coluna após passar pelo condensador e D_k o destilado obtido na saída do condensador.

Os valores de α_k e β_k são obtidos através da linearização do termo potencial da função de custo de cada coluna dentro da faixa de fluxos aplicados. A Tabela 7 contém os dados obtidos para uma mistura inicial de 2 mil kmol/h com $X_A=0,30$; $X_B=0,15$; $X_C=0,25$ e $X_D=0,30$.

Tabela 7 - Valores de α_k , β_k e K_k para cada coluna de destilação.

K	Separador	α_k (10^{-3} €/ano)	β_k (10^{-3} € h/kmol ano)	K_k (10^{-6} kJ.h/kmol)
1	A/BCD	245	0,40	0,026
2	AB/CD	102	0,14	0,040
3	ABC/D	135	0,25	0,050
4	B/CD	70	0,15	0,044
5	BC/D	130	0,25	0,050
6	A/BC	260	0,80	0,021
7	AB/C	90	0,09	0,043
8	C/D	116	0,22	0,048
9	B/C	74	0,10	0,040
10	A/B	215	0,43	0,026

Fonte: adaptado de Briones *et al.* (2020).

A partir dos dados obtidos, inicia-se a construção da planilha eletrônica, mostrada na Figura 32.

Figura 32 - Planilha com os valores inseridos para otimização de colunas de destilação.

Variables									
Flow rates			Heat duties (B°C)			Binary variables			
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
VARIABLES	F_k (kmol/h)	K_k (10^{-6} kJ h/kmol)	Q_k (kJ 10^{-6})	α_k (10^{-3} €/yr)	y_k	$\alpha_k y_k$ (10^{-3} €/yr)	β_k (10^{-3} € h/kmol year)	$\beta_k F_k$ (€ 10^{-3} / year)	
3 F1	50	0,026	1,3	245	1	245	0,4	20	
4 F2	50	0,04	2	102	1	102	0,14	7	
5 F3	50	0,05	2,5	135	1	135	0,25	12,5	
6 F4	50	0,044	2,2	70	1	70	0,15	7,5	
7 F5	50	0,05	2,5	130	1	130	0,25	12,5	
8 F6	50	0,021	1,05	260	1	260	0,8	40	
9 F7	50	0,043	2,15	90	1	90	0,09	4,5	
10 F8	50	0,048	2,4	116	1	116	0,22	11	
11 F9	50	0,04	2	74	1	74	0,1	5	
12 F10	50	0,026	1,3	215	1	215	0,43	21,5	
13			19,4		10	1437		141,5	Totals
14	Mass balances								
15	logic constraints								
16	eq 2	-1850	eq 8	-1950	Objective function				
17	eq 3	65	eq 9	-1950					
18	eq 4	65	eq 10	-1950					
19	eq 5	-4,65	eq 11	-1950					
20	eq 6	-7,1	eq 12	-1950					
21	eq 7	-16,8	eq 13	-1950					
22			eq 14	-1950					
23			eq 15	-1950					
24			eq 16	-1950					
25			eq 17	-1950					
26	Constraints								

Fonte: Briones *et al.* (2020).

Nas células de A3 a A12 são posicionados os fluxos molares, nas células paralelas são inseridos os dados obtidos previamente e na linha 13 do software é exibido o somatório das variáveis. As células com as equações de balanços de massa e restrições lógicas, são explicitamente detalhadas no trabalho de Briones *et al.* (2020). No caso do exemplo em questão, foi realizado um chute inicial de 50 kmol/h para todos os fluxos molares.

Feito isso, a planilha está suficientemente carregada para executar os cálculos da função objetivo através da ferramenta *Solver*. Na célula F17 é digitado **=G13+I13+(30+1,5)*D13**. O *Solver* é aberto e na janela do mesmo é selecionado a célula F17 como objetivo, escolhendo a opção para minimizar, inserindo as células com valores de fluxo (B3:B12) e as células com as variáveis binárias (F3:F12) como células variáveis e carregando as restrições de igualdades e desigualdades do ANEXO E na caixa de restrições. Ainda na janela do *Solver*, no botão opções é checado se a opção “ignorar restrições de números inteiros” está desmarcada, voltando a janela principal do *Solver* é escolhido o método “GRG Não Linear” e clica-se no botão resolver. Então, são exibidos na planilha os novos valores que satisfazem a otimização, como mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Planilha com os valores obtidos após o uso do *solver* nas colunas de destilação.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	VARIABLES								
2		F_k (kmol/h)	K_k (10^{-5} kJ h/kmol)	Q_k (kJ 10^{-6})	α_k (10^{-3} €/yr)	y_k	$\alpha_k y_k$ (10^{-3} €/yr)	β_k (10^{-3} €/kmol year)	$\beta_k F_k$ (€ 10^{-3} / year)
3	F1	1,4211E-14	0,026	3,69482E-16	245	0	0	0,4	5,68434E-15
4	F2	2000	0,04	80	102	1	102	0,14	280
5	F3	0	0,05	0	135	0	0	0,25	0
6	F4	0	0,044	0	70	0	0	0,15	0
7	F5	9,9476E-15	0,05	4,9738E-16	130	0	0	0,25	2,4869E-15
8	F6	0	0,021	0	260	0	0	0,8	0
9	F7	0	0,043	0	90	0	0	0,09	0
10	F8	1100	0,048	52,8	116	1	116	0,22	242
11	F9	5,6801E-15	0,04	2,27203E-16	74	0	0	0,1	5,68008E-16
12	F10	900	0,026	23,4	215	1	215	0,43	387
13				156,2		3	433		909
14	Mass balances	logic constraints							
15									
16	eq. 2	0	eq. 8	1,42109E-14					
17	eq. 3	0	eq. 9	0	C (€ 10^{-3} /year) =	6262,3			
18	eq. 4	0	eq. 10	0					
19	eq. 5	0	eq. 11	0					
20	eq. 6	0	eq. 12	9,9476E-15					
21	eq. 7	0	eq. 13	0					
22			eq. 14	0					
23			eq. 15	-900					
24			eq. 16	5,68008E-15					
25			eq. 17	-1100					
26									

Fonte: Briones *et al.* (2020).

O *Solver* encontra uma solução que possui $F_2=2$ mil kmol/h, $F_8=1,1$ mil kmol/h, $F_{10}=900$ kmol/h e $y_2=y_8=y_{10}=1$. Com isso, é obtido através do *Solver* uma sequência em que os componentes A e B são separados de C e D na coluna 2, posteriormente,

A é separado de B na coluna 8 e C é separado de D na coluna 10. O custo total obtido, visualizado na célula F17, é de 6,2623 milhões de euros. Com isso, tem-se os valores finais para a otimização proposta, calculados por uma planilha do Excel de fácil manuseio e acessível para muitos profissionais e estudantes da área.

3.6.4 Sistemas em rede de trocadores de calor

Os trocadores de calor são equipamentos interessantes na área térmica da Engenharia Química e extremamente usados nos processos industriais. Esses equipamentos podem ser utilizados em rede para um melhor aproveitamento das correntes fria e quente. Briones e Escola (2019) trouxeram à comunidade acadêmica o estudo sobre a otimização de uma rede de trocadores utilizando um procedimento dentro de uma planilha eletrônica do Excel, ensinada para alunos de mestrado em engenharia química na *Juan Carlos University* e *Autónoma University de Madrid*, não sendo necessária a utilização de softwares mais complexos e menos intuitivos. O exemplo adotado para o estudo foi um problema que consiste em duas correntes quentes, H1 e H2, que devem ser resfriadas e duas correntes frias, C1 e C2, que devem ser aquecidas, sendo que a diferença mínima de temperatura entre o fluido quente e frio em cada trocador seja de 20°C. Os dados para o produto entre o fluxo molar F e a capacidade térmica C_p e as temperaturas de entrada e saída das correntes H1, H2, C1 e C2 são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades das correntes.

Stream	FC_P (MW/°C)	T_{entrada} (°C)	T_{saída} (°C)
H1	1.3	400	140
H2	2.2	340	120
C1	1.8	160	380
C2	1.5	100	320

Fonte: Briones e Escola (2019).

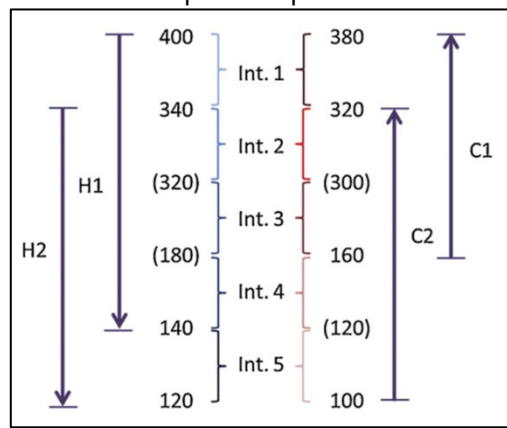
O procedimento de Briones e Escola (2019) para a otimização é realizado por uma função objetivo para minimizar os custos, dada pela Equação (8).

$$C = 80000Q_s + 20000Q_w \quad (8)$$

em que Q_s é o vapor utilizado a 450°C para o aquecimento, com um custo de 80 mil $\$/\text{MW}$ e Q_w é a água utilizada a 20°C para resfriamento, com um custo de 20 mil $\$/\text{MW}$.

Posteriormente, determinam-se os intervalos exibidos na Figura 34, considerando uma diferença de 20°C entre as correntes correspondentes e supõe-se valores virtuais para correntes que não se têm valores reais para o lado frio e o lado quente. Destaca-se que o trabalho original é em inglês e, por isso, as representações oriundas do Excel também estão em inglês.

Figura 34 - Intervalos de temperatura para os dados do caso estudado.



Fonte: Briones e Escola (2019).

Atinge-se um número de cinco intervalos e utiliza-se os valores das temperaturas ilustradas para realizar o cálculo da entalpia de cada intervalo, através da Equação (9).

$$P = FC_p(T_1 - T_2) \quad (9)$$

na qual P é a entalpia e o termo $(T_1 - T_2)$ corresponde à diferença de temperatura englobada no específico intervalo. Os valores obtidos para a entalpia de cada intervalo são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Entalpias das correntes quentes e frias em cada intervalo de temperatura.

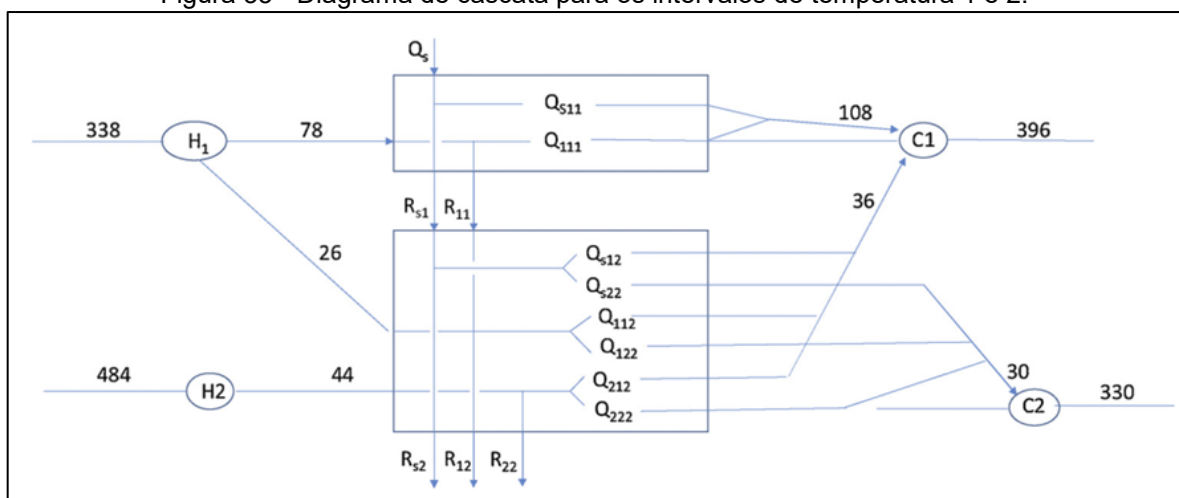
Stream	H1 (MW)	H2 (MW)	C1 (MW)	C2 (MW)
Intervalo 1	78	-	108	-
Intervalo 2	26	44	36	30
Intervalo 3	182	308	252	210
Intervalo 4	52	88	-	60
Intervalo 5	-	44	-	30
Total	338	484	396	330

Fonte: adaptado de Briones e Escola (2019).

Com os dados da Tabela 9, é possível construir um diagrama em cascata, para que cada intervalo de temperatura seja representado por uma caixa, no qual as linhas saem da caixa para os fluxos frios e entram na caixa para os fluxos quentes, de acordo com a associação dos fluxos de potência operando em cada intervalo. Além disso, Q_s é alimentado no intervalo 1, pois é o intervalo que corresponde a temperatura mais alta, enquanto que no intervalo 5 é alimentado Q_w , pois é o intervalo com as temperaturas mais baixas.

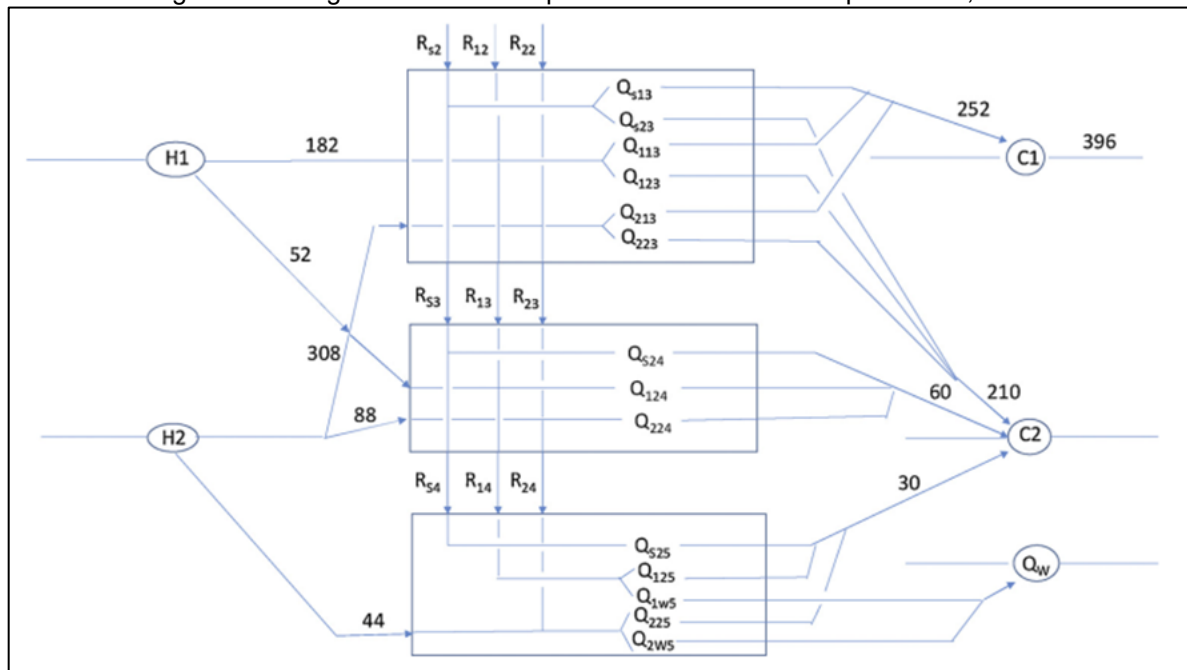
Em cada caixa, a diferença residual da potência de aquecimento cai para o intervalo inferior, sendo denotada por R_{sk} ou R_{nk} , em que s corresponde o vapor, n o número do fluxo quente e k o intervalo de temperatura associado. As potências de aquecimento trocada em cada intervalo de temperatura são Q_{nmk} , Q_{smk} e Q_{nw} , em que n representa o número do fluxo quente doador, m o número do fluxo frio receptor associado e w a água de resfriamento do receptor. Dentro de cada intervalo, vários balanços de energia são determinados nos diferentes nós que constituem as restrições de igualdade para o problema de otimização estudado, exibidas no ANEXO C e explicadas mais detalhadamente no estudo de Briones e Escola (2019). O diagrama de cascata para os intervalos 1 e 2 são apresentados na Figura 35 e para os intervalos 3, 4 e 5 são mostrados na Figura 36.

Figura 35 - Diagrama de cascata para os intervalos de temperatura 1 e 2.



Fonte: Briones e Escola (2019).

Figura 36 - Diagrama de cascata para os intervalos de temperatura 3, 4 e 5.



Fonte: Briones e Escola (2019).

Com isso, inicia-se a construção da planilha, inserindo os nomes das variáveis na coluna A, chutes iniciais para as variáveis associadas na coluna B e nas colunas posteriores os nomes dos intervalos e da função objetivo (FO) e as fórmulas das equações de restrições, mostradas no ANEXO D. Então, obtém-se a planilha eletrônica mostrada na Figura 37.

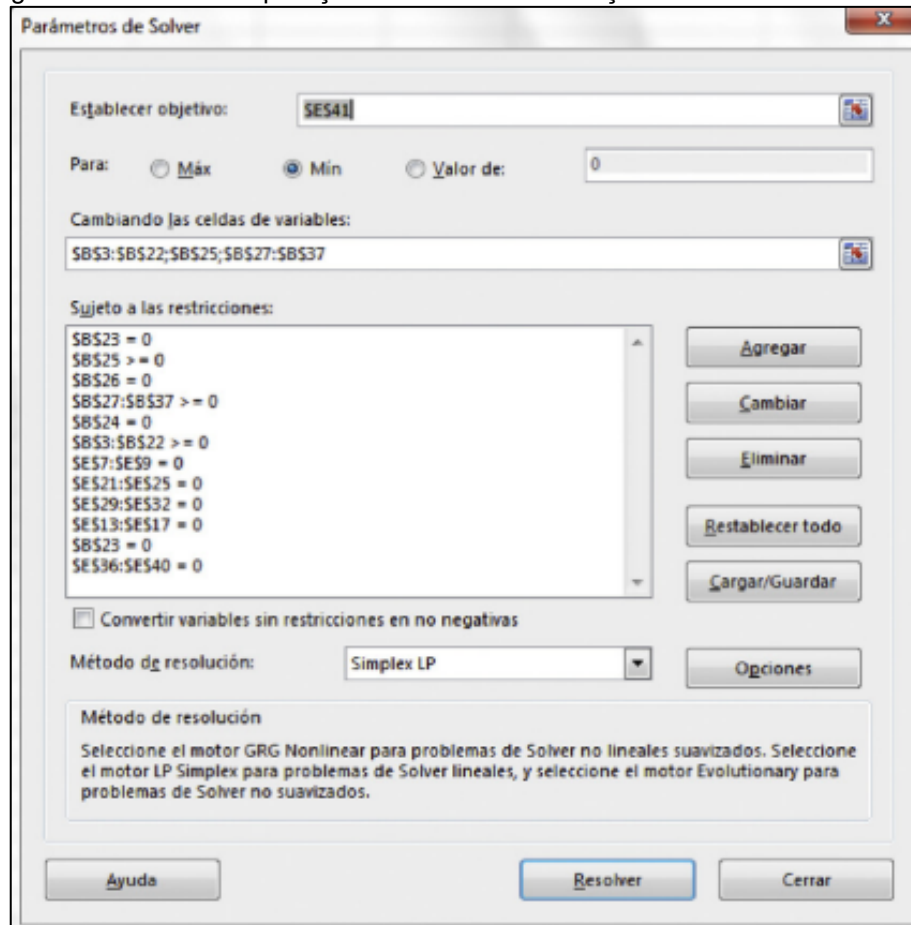
Figura 37 - Planilha eletrônica para otimização do sistema em rede de trocadores de calor.

A	B	C	D	E	F	G
VARIABLES						
Q5	50		Constraints			
QW	50					
RS1	50		INTERVAL 1			
RS2	50					
RS3	50				-50	
RS4	50				-58	
R11	50				-28	
R12	50					
R13	50		INTERVAL 2			
R14	50					
R22	50				-100	
R23	50				-24	
R24	50				-105	
Q511	50				64	
Q512	50				120	
Q522	50					
Q513	50		INTERVAL 3			
Q523	50					
Q524	50				-100	
Q525	50				132	
Q111	0				208	
Q112	0				-152	
Q122	60				-60	
Q113	0					
Q123	50		INTERVAL 4			
Q124	50					
Q125	50				-50	
Q212	50				2	
Q222	50				38	
Q213	50				90	
Q223	50					
Q224	50		INTERVAL 5			
Q225	50					
Q1W5	50				0	
Q2W5	50				-50	
					-6	
					120	
					50	
					50	

Fonte: adaptado de Briones e Escola (2019).

Com os dados necessários inseridos na planilha, aplica-se o *Solver*, abre-se a janela do mesmo e insere-se a equação da célula E41 para a função objetivo, seleciona-se as células variáveis na coluna B e carrega-se as restrições de igualdades e desigualdades, seleciona-se o método “*LP Simplex*” e clica-se em resolver, mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Janela de aplicação do *solver* na otimização dos trocadores de calor.



Fonte: adaptado de Briones e Escola (2019).

Obtém-se os novos valores exibidos na planilha, mostrado na Figura 39, sendo um valor de 108 MW para Q_s , 204 MW para Q_w e um custo 12 milhões e 720 mil dólares para o caso estudado por Briones e Escola (2019)

Com isso, o caso estudado por Briones e Escola (2019) é otimizado para um custo mínimo, utilizando um procedimento de fácil aplicação Excel, gerando uma planilha que exhibe os resultados e valores para todas as variáveis.

Figura 39 - Valores obtidos na otimização dos trocadores de calor após a aplicação do *solver*.

	A	B	C	D	E	F	G
1	VARIABLES						
2							
3	QS	108		Constraints			
4	QW	204					
5	RS1	0		INTERVAL 1			
6	RS2	0					
7	RS3	0			0		
8	RS4	0			0		
9	R11	78			0		
10	R12	74					
11	R13	110		INTERVAL 2			
12	R14	162					
13	R22	8			0		
14	R23	0			0		
15	R24	28			0		
16	QS11	108			0		
17	QS12	0			0		
18	QS22	0					
19	QS13	0		INTERVAL 3			
20	QS23	0					
21	QS24	0			0		
22	QS25	0			0		
23	Q111	0			0		
24	Q112	0			0		
25	Q122	30			0		
26	Q113	0					
27	Q123	148		INTERVAL 4			
28	Q124	0					
29	Q125	30			0		
30	Q212	36			0		
31	Q222	0			0		
32	Q213	252			0		
33	Q223	84					
34	Q224	80		INTERVAL 5			
35	Q225	0					
36	Q1W5	132			0		
37	Q2W5	72			0		
38					0		
39					0		
40					0		
41				FO	12720000		
42							
43							
44							
45							
46							
47							
48							
49							

Fonte: adaptado de Briones e Escola (2019).

4 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Portanto, com base nos documentos pesquisados na literatura e apresentados no presente trabalho, percebe-se que o software de planilhas eletrônicas da Microsoft, o Excel, é uma potencial ferramenta a ser usada nos campos das engenharias. Através do Excel, engenheiros e estudantes da área são capazes de desenvolverem planilhas práticas, de fácil manuseio e com custo favorável para resolverem problemas que variam dos simples aos mais complexos processos.

Muitos desses problemas exigem recursos disponibilizados por softwares com alto custo de licença e até mesmo com alto nível de dificuldade de manuseio pelo usuário, sendo que em muitos casos, o Excel com as suas diversas funcionalidades permite ao usuário criar planilhas ou até mesmo *dashboards* capazes de resolverem

esses problemas. Alguns desses casos são discutidos, por exemplo, nos trabalhos de Oliva *et al.* (2018); Oliveira *et al.* (2019); Briones e Escola (2019) e Briones *et al.* (2020), os quais apresentaram planilhas de baixo custo e intuitivas aos usuários. Já nos trabalhos de Simonelli, Lobato dos Santos e Dela Fonte (2017); Brunskill (2020); Bezerra, Fraga e Dias (2013) e Gossage (2015), é evidente a praticidade de planilhas desenvolvidas no Excel para resolverem os extensos e/ou complexos problemas de engenharia com rapidez e redução de erros.

Com isso, conclui-se que o Excel merece destaque no meio acadêmico nas áreas das engenharias, ressaltando a área da engenharia química, propiciando a formação de profissionais capacitados a resolverem problemas através do desenvolvimento e manuseio de planilhas eletrônicas.

Sugere-se o aprofundamento do assunto abordado no presente estudo em trabalhos futuros, desde que as aplicações do Excel é um tema muito amplo e inovador. É possível desenvolver planilhas ainda mais sofisticadas das que foram apresentadas, como estudos de caso para operações unitárias; é possível modificar planilhas encontradas na literatura de modo a resolver problemas com diferentes condições ou hipóteses; é viável propor o desenvolvimento de planilhas eletrônicas no Excel aplicadas à engenharia para casos ainda não abordados na literatura; além da possibilidade de se fazer uma revisão da literatura, visando apresentar a comunidade acadêmica outras aplicações, por exemplo nas áreas da termodinâmica e de reatores.

REFERÊNCIAS

BEZERRA, Rui M. F.; FRAGA, Irene; DIAS, Albino A. Utilization of integrated Michaelis-Menten equations for enzyme inhibition diagnosis and determination of kinetic constants using Solver supplement of Microsoft Office Excel. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, [S. l.], v. 109, n. 1, p. 26–31, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2012.08.017>

BRIONES, L.; ESCOLA, J. M. Application of the Microsoft Excel Solver tool in the solution of optimization problems of heat exchanger network systems. **Education for Chemical Engineers**, [S. l.], v. 26, p. 41–47, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2018.10.003>

BRIONES, Laura *et al.* Application of the microsoft excel solver tool in the optimization of distillation sequences problems. **Computer Applications in Engineering Education**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 304–313, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cae.22193>. Acesso em: 19 set. 2020.

BRUNSKILL, Amelia. A Microsoft Excel Approach to Reduce Errors and Increase Efficiency in Systematic Searching. **Medical Reference Services Quarterly**, [S. l.], v. 39, n. 1, p. 15–26, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02763869.2020.1704598>. Acesso em: 20 set. 2020.

CAMARGO, Martins. Ontogênese do ritmo de consumo de oxigênio em operárias de *Melipona quadrifasciata* (Hymenoptera ; Meliponini): a influência da luz, [S. l.], 2012.

CAMPISSI, Thales. **Função PROCX: o que é e como utilizar? | Blog Voitto**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/funcao-procx>. Acesso em: 7 out. 2021.

CHARLIE YOUNG, P. E. Excel solver: which solving method should i choose? [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://engineerexcel.com/excel-solver-solving-method-choose>. Acesso em: 5 nov. 2021.

CONCAT (Função CONCAT). [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/concat-função-concat-9b1a9a3f-94ff-41af-9736-694cbd6b4ca2>. Acesso em: 7 out. 2021.

Definir e resolver um problema usando o Solver. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/definir-e-resolver-um-problema-usando-o-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>. Acesso em: 7 out. 2021.

DONGARE, S. *et al.* Shortcut Design Method for Multistage Binary Distillation via MS-Excel. **Rashtrasant Tukadoji Maharaj Nagpur Unrversity Nagpur**, [S. l.], v. 6, n. 10, p. 06–12, 2016.

É (Funções É). [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/é-funções-é-0f2d7971-6019-40a0-a171-f2d869135665>. Acesso em: 7 out. 2021.

ESESP. **Excel básico Eixo: Conhecimento de Rede.** [S. l.], 2019.

Especificações e limites do Microsoft Excel. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/especificações-e-limites-do-microsoft-excel-1672b34d-7043-467e-8e27-269d656771c3>. Acesso em: 6 out. 2021.

FIGUEIRA, Jalves S.; VEIT, Eliane A. Usando o Excel para medidas de intervalo de tempo no laboratório de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 203–211, 2004.

FORMBY, Sam K.; MEDLIN, B. Dawn; ELLINGTON, Virginia. Microsoft Excel®: Is It An Important Job Skill for College Graduates? **Information Systems Education Journal (ISEDJ)**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 55–63, 2017.

Função CORRESP. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/função-corresp-e8dff45-c762-47d6-bf89-533f4a37673a>. Acesso em: 7 out. 2021.

Função MÁXIMO. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/função-máximo-e0012414-9ac8-4b34-9a47-73e662c08098>. Acesso em: 7 out. 2021.

Função POTÊNCIA. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/função-potência-d3f2908b-56f4-4c3f-895a-07fb519c362a>. Acesso em: 7 out. 2021.

Função UNIRTEXTO. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/função-unirtexto-357b449a-ec91-49d0-80c3-0e8fc845691c>. Acesso em: 7 out. 2021.

GOSSAGE, John L. Plotting mccabe-thiele diagrams in microsoft excel. **Computers in Education Journal**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 20–30, 2015.

ÍNDICE (Função ÍNDICE). [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/índice-função-índice-a5dcf0dd-996d-40a4-a822-b56b061328bd>. Acesso em: 7 out. 2021.

INDIRETO (Função INDIRETO). [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/indireto-função-indireto-474b3a3a-8a26-4f44-b491-92b6306fa261>. Acesso em: 7 out. 2021.

KURTZ, João. **Fórmulas do Excel: as 68 funções mais importantes do programa.** [s. l.], 2019. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/listas/2019/01/formulas-do-excel-as-68-funcoes-mais-importantes-do-programa.ghml>. Acesso em: 7 out. 2021.

MEYER, Maximiliano. **História do Excel.** [s. l.], 2013. Disponível em: <https://www.aprenderexcel.com.br/2013/artigos/historia-do-excel>. Acesso em: 22 set. 2020.

OIKE; OGAWA; OISHI. Simple and Quick Visualization of Periodical Data Using Microsoft Excel. **Methods and Protocols**, [S. l.], v. 2, n. 4, p. 81, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mps2040081>. Acesso em: 20 set. 2020.

OLIVA, José J. R. *et al.* Avaliação de árvores de falhas mediante uma planilha EXCEL. **Ingeniería Energética**, [S. l.], v. 39, n. 1, p. 56–61, 2018.

OLIVEIRA, Charles Jaster *et al.* Aplicação do software Excel como ferramenta de ensino para resolução de treliças planas utilizando elementos finitos de barras. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 40, n. 2, p. 1–13, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5020/23180730.2019.9903>. Acesso em: 20 set. 2020.

PROCV (Função PROCV). [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/procv-função-procv-0bbc8083-26fe-4963-8ab8-93a18ad188a1>. Acesso em: 7 out. 2021.

RODRIGUES, Leonardo. **Excel VBA: o que é e como funciona | Blog Voitto**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/excel-vba>. Acesso em: 7 out. 2021.

ROTHER, Edna Terezinha. **Revisão sistemática X revisão narrativa**. São Paulo: Departamento de Enfermagem/Universidade Federal de Sao Paulo, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-21002007000200001>. Acesso em: 22 set. 2020

SE (Função SE). [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/se-função-se-69aed7c9-4e8a-4755-a9bc-aa8bbff73be2>. Acesso em: 7 out. 2021.

SIMONELLI, George; LOBATO DOS SANTOS, Luiz Carlos; DELA FONTE, Suelem Sá. DIMENSIONAMENTO DO BOMBEIO MECÂNICO COM HASTES EM EXCEL®. **HOLOS**, [S. l.], v. 7, n. 0, p. 17, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2017.4612>. Acesso em: 20 set. 2020.

SOMA (Função SOMA). [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/soma-função-soma-043e1c7d-7726-4e80-8f32-07b23e057f89>. Acesso em: 7 out. 2021.

SORIANO, HL; LIMA, SDES. Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas Vol. 48. [S. l.], 2003.

Usar o Gerenciador de Nomes no Excel. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/usar-o-gerenciador-de-nomes-no-excel-4d8c4c2b-9f7d-44e3-a3b4-9f61bd5c64e4>. Acesso em: 7 out. 2021.

ANEXO A – Equações para bombeio mecânico com hastes.

A série de equações apresentadas no procedimento para o dimensionamento de bombeio mecânico com hastes utilizado no trabalho de Simonelli, Lobato dos Santos e Dela Fonte (2017) são descritas a seguir.

Inicialmente, calcula-se algumas variáveis importantes, sendo a primeira delas o comprimento da Haste polida (S), medida em polegadas, calculada pela Equação (10).

$$S = \frac{2cd_1}{d_2} \quad (10)$$

em que d_1 e d_2 são as dimensões da viga e c o comprimento, em polegadas, da manivela. Após, calcula-se a área ocupada pelo pistão (A_p), medida em polegadas quadradas, pela Equação (11).

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (11)$$

sendo que d_p é o diâmetro do pistão, medido em polegadas. Então, calcula-se a área transversal das hastes de bombeio (A_r), em polegadas quadradas, pela Equação (12).

$$A_r = \frac{\pi d_r^2}{4} \quad (12)$$

na qual d_r é o diâmetro da seção da haste, em polegadas. Em seguida, calcula-se o peso da coluna de haste no ar (W_r), medida em libra-força, pela Equação (13).

$$W_r = \frac{\gamma_s D A_r}{144} \quad (13)$$

sendo γ_s o peso específico do aço (490 lbf/ft³) e D a profundidade de assentamento da bomba, medida em pés cúbicos. No próximo passo, calcula-se o peso efetivo do fluido sobre o pistão (W_f), em libra-força, com a Equação (14).

$$W_f = 62,4 S_f \frac{DA_p}{144} \quad (14)$$

em que S_f é a densidade relativa do fluido. A carga máxima da haste polida (PRL_{max}), medida em libra-força, é expressa pela Equação (15).

$$PRL_{max} = W_f - 62,4 S_f \frac{W_r}{\gamma_s} + W_r + W_r F_1 \quad (15)$$

sendo F_1 expressado pela Equação (16).

$$F_1 = \frac{\left(1 \pm \frac{c}{h}\right) SN^2}{70471,2} \quad (16)$$

em que N é o número de ciclos por minuto e h é o comprimento da biela, em polegadas. Se a unidade for do tipo convencional utiliza-se o sinal positivo e se a unidade for balanceada a ar deve-se utilizar o sinal negativo. Continuando, a carga mínima de haste polida (PRL_{min}), em libra-força, é obtida pela Equação (17).

$$PRL_{min} = -62,4 S_f \frac{W_r}{\gamma_s} + W_r - W_r F_2 \quad (17)$$

Obtém-se F_2 com a Equação (18).

$$F_2 = \frac{\left(1 \mp \frac{c}{h}\right) SN^2}{70471,2} \quad (18)$$

O valor de contrabalanceio (C) ideal, em libras, é dado pela média das PRL e é obtido pela Equação (19).

$$C = \frac{1}{2} (PRL_{max} + PRL_{min}) \quad (19)$$

O torque máximo (T), em libra-força polegada, é expresso pela Equação (20).

$$T = \frac{1}{4}S \left(W_f + \frac{2SN^2W_r}{70471,2} \right) \quad (20)$$

A velocidade da bomba (N_{limit}), ciclos por minuto, é calculada pela Equação (21).

$$N_{limit} = \sqrt{\frac{70471,2L}{S \left(1 \mp \frac{c}{h} \right)}} \quad (21)$$

Para unidade do tipo convencional usa-se o sinal negativo, se a unidade for balanceada a ar deve-se utilizar o sinal positivo da equação. Seguindo, calcula-se o curso do pistão (S_p), em polegadas, pela Equação (22).

$$S_p = S - \frac{12D}{E} \left[W_f \left(\frac{1}{A_r} + \frac{1}{A_t} \right) - \frac{SN^2MW_r}{70471,2A_r} \right] \quad (22)$$

em que $E = 30 \cdot 10^6$ lbf/m². A vazão de líquido produzida (q), em stb/dia, é obtida pela Equação (23).

$$q = 0,1484 \frac{A_p NS_p E_v}{B_o} \quad (23)$$

sendo E_v a eficiência volumétrica da bomba e B_o o fator volume de formação do óleo, medido em bbl/stb. A potência necessária (P_h), em hp, para elevar os fluidos à superfície é expressa pela Equação (24).

$$P_h = 7,36 \cdot 10^{-6} q \gamma_l L_N \quad (24)$$

na qual γ_l é a gravidade específica e L_N expresso pela Equação (25).

$$L_N = H + \frac{p_{tf}}{0,433\gamma_l} \quad (25)$$

em que H é a profundidade média do fluido no anular, dada em pés, e p_{tf} é a pressão de fluxo na cabeça da coluna de produção, em libra-força por polegada quadradas. A potência (P_f) necessária para superar as perdas por atrito é estimada pela Equação (26).

$$P_f = 6,31 \cdot 10^{-7} W_r S N \quad (26)$$

A potência requerida pelo motor principal (P_{pm}) é expressa pela Equação (27).

$$P_{pm} = F_s (P_h + P_f) \quad (27)$$

sendo F_s o fator de segurança (1,25 até 1,50).

ANEXO B - Código VBA para planilha de destilação binária em multiestágios.

```

Public Function FXBS(DVrange As Range, IVrange As Range, _
IVvalue As Double) As Double
Dim DV() As Double
Dim IV() As Double
Dim DVk() As Double
Dim IVk() As Double
Dim u As Double
Dim j As Long
Dim n As Long
Dim newn As Long
Dim a As Double
Dim b As Double
Dim c As Double
Dim d As Double
Dim flow As Double
Dim fhigh As Double

If IVvalue = IVvalue ^ 2 Then
' If true, then IVvalue = 0 or 1
FXBS = IVvalue
Exit Function
End If

n = DVrange.Rows.Count
newn = n

ReDim DV(n + 5), IV(n + 5), DVk(1 To n + 4), IVk(1 To n + 4)

For j = 0 To 2
DV(j) = 0
IV(j) = 0
DV(j + n + 3) = 1
IV(j + n + 3) = 1
Next j

For j = 3 To n + 2
DV(j) = DVrange(j - 2)
IV(j) = IVrange(j - 2)
If DV(j) = 1 Then newn = newn - 1
Next j

n = newn

For j = n + 4 To n + 3 Step -1
DVk(j) = (DV(j - 1) + 4 * DV(j) + DV(j + 1)) / 6
IVk(j) = (IV(j - 1) + 4 * IV(j) + IV(j + 1)) / 6
If IVk(j) <= IVvalue Then GoTo CubicDef
Next j

```

```
fhigh = IVk(n + 3) - DVk(n + 3)
```

```
For j = n + 2 To 1 Step -1
```

```
DVk(j) = (DV(j - 1) + 4 * DV(j) + DV(j + 1)) / 6
```

```
IVk(j) = (IV(j - 1) + 4 * IV(j) + IV(j + 1)) / 6
```

```
If IVk(j) <= IVvalue Then GoTo CubicDef
```

```
If IVvalue < 0 Then
```

```
' IVvalue < 0 indicates an azeotrope search
```

```
flow = IVk(j) - DVk(j)
```

```
If fhigh * flow <= 0 Then GoTo CubicDef
```

```
fhigh = flow
```

```
End If
```

```
Next j
```

```
' IVk(j) <= IVvalue < IVk(j+1)
```

```
' Define the cubic equation:  $a \cdot u^3 + b \cdot u^2 + c \cdot u + d = 0$ 
```

```
CubicDef:
```

```
a = -IV(j - 1) + 3 * IV(j) - 3 * IV(j + 1) + IV(j + 2)
```

```
b = 3 * IV(j - 1) - 6 * IV(j) + 3 * IV(j + 1)
```

```
c = -3 * IV(j - 1) + 3 * IV(j + 1)
```

```
d = IV(j - 1) + 4 * IV(j) + IV(j + 1) - 6 * IVvalue
```

```
If IVvalue < 0 Then
```

```
' IVvalue < 0 indicates an azeotrope search
```

```
a = a - (-DV(j - 1) + 3 * DV(j) - 3 * DV(j + 1) + DV(j + 2))
```

```
b = b - (3 * DV(j - 1) - 6 * DV(j) + 3 * DV(j + 1))
```

```
c = c - (-3 * DV(j - 1) + 3 * DV(j + 1))
```

```
d = d - (DV(j - 1) + 4 * DV(j) + DV(j + 1) - 6 * IVvalue)
```

```
End If
```

```
' Now find value of u that solves the cubic eq'n
```

```
u = FXCubic(a, b, c, d, 0, 1)
```

```
FXBS = ((1 - u) ^ 3 * DV(j - 1) + _  
(3 * u ^ 3 - 6 * u ^ 2 + 4) * DV(j) + _  
(-3 * u ^ 3 + 3 * u ^ 2 + 3 * u + 1) * DV(j + 1) + _  
u ^ 3 * DV(j + 2)) / 6
```

```
End Function
```

```
Public Function FXCubic(a As Double, b As Double, c As Double, _  
d As Double, xlow As Double, xhigh As Double) As Double
```

```
Dim f As Double
```

```
Dim g As Double
```

```
Dim h As Double
```

```
Dim i As Double
```

```
Dim j As Double
```

```

Dim k As Double
Dim m As Double
Dim n As Double
Dim p As Double
Dim r As Double
Dim s As Double
Dim t As Double
Dim u As Double
Dim x As Double
Dim eps As Double

```

```

eps = (a ^ 2 + b ^ 2 + c ^ 2 + d ^ 2) * 0.0000000001

```

```

If eps = 0 Then

```

```

FXCubic = 0

```

```

Exit Function

```

```

End If

```

```

If Abs(a) < eps Then

```

```

' We have the quadratic  $b*x^2 + c*x + d = 0$  instead of a cubic

```

```

If Abs(b) < eps Then

```

```

' We have the linear equation  $c*x + d = 0$ 

```

```

FXCubic = -d / c

```

```

Exit Function

```

```

End If

```

```

FXCubic = (-c + (c ^ 2 - 4 * b * d) ^ (1 / 2)) / (2 * b)

```

```

If FXCubic >= xlow And FXCubic <= xhigh Then Exit Function

```

```

FXCubic = (-c - (c ^ 2 - 4 * b * d) ^ (1 / 2)) / (2 * b)

```

```

Exit Function

```

```

End If

```

```

' Apply the method shown at http://www.1728.org/cubic2.htm

```

```

f = (3 * c / a - b ^ 2 / a ^ 2) / 3

```

```

g = (2 * b ^ 3 / a ^ 3 - 9 * b * c / a ^ 2 + 27 * d / a) / 27

```

```

' If f = g = 0, then all three roots are real and equal

```

```

If (Abs(f) < eps And Abs(g) < eps) Then

```

```

FXCubic = (Abs(d / a) ^ (1 / 3)) * Sgn(d / a)

```

```

Exit Function

```

```

End If

```

```

h = g ^ 2 / 4 + f ^ 3 / 27

```

```

' If h <= 0, three real roots; if h > 0, only one real root

```

```

If h <= 0 Then

```

```

i = Sqr(g ^ 2 / 4 - h)

```

```

j = i ^ (1 / 3)

```

```

x = -g / (2 * i)

```

```

' k = Acos(x), but VBA has no built-in Acos function

```

```

k = Atn(-x / Sqr(-x * x + 1)) + 2 * Atn(1)

```

```

FXCubic = 2 * j * Cos(k / 3) - b / (3 * a)
If FXCubic >= xlow And FXCubic <= xhigh Then Exit Function
m = Cos(k / 3)
n = 3 ^ (1 / 2) * Sin(k / 3)
p = -b / (3 * a)
FXCubic = -j * (m + n) + p
If FXCubic >= xlow And FXCubic <= xhigh Then Exit Function
FXCubic = -j * (m - n) + p
Exit Function
End If

```

' h > 0, so only one real root

```

r = -g / 2 + Sqr(h)
If (r <> 0) Then s = (Abs(r) ^ (1 / 3)) * Sgn(r) Else s = 0
t = -g / 2 - Sqr(h)
If (t <> 0) Then u = (Abs(t) ^ (1 / 3)) * Sgn(t) Else u = 0
FXCubic = (s + u) - b / (3 * a)
End Function

```

ANEXO C - Equações das restrições para o sistema em rede de trocadores de calor.

Intervalo 1:

$$Q_s - Q_{s11} - R_{s1} = 0$$

$$Q_{s11} + Q_{111} - 108 = 0$$

$$Q_{111} + R_{11} - 78 = 0$$

Intervalo 2:

$$R_{s1} - R_{s2} - Q_{s12} - Q_{s22} = 0$$

$$R_{11} - R_{12} - Q_{112} - Q_{122} + 26 = 0$$

$$R_{22} + Q_{212} + Q_{222} - 44 = 0$$

$$Q_{s12} + Q_{112} + Q_{212} - 36 = 0$$

$$Q_{s22} + Q_{122} + Q_{222} - 30 = 0$$

Intervalo 3:

$$R_{s2} - R_{s3} - Q_{s13} - Q_{s23} = 0$$

$$R_{12} + 182 - R_{13} - Q_{113} - Q_{123} = 0$$

$$R_{22} + 308 - R_{23} - Q_{213} - Q_{223} = 0$$

$$Q_{s13} + Q_{113} + Q_{213} - 252 = 0$$

$$Q_{s23} + Q_{123} + Q_{223} - 210 = 0$$

Intervalo 4:

$$R_{s3} - Q_{s24} - R_{s4} = 0$$

$$R_{13} + 52 - Q_{124} - R_{14} = 0$$

$$R_{23} + 88 - Q_{224} - R_{24} = 0$$

$$Q_{s24} + Q_{124} + Q_{224} - 60 = 0$$

Intervalo 5:

$$R_{s4} - Q_{s25} = 0$$

$$R_{14} - Q_{125} - Q_{1w5} = 0$$

$$R_{24} + 44 - Q_{225} - Q_{2w5} = 0$$

$$Q_{s25} + Q_{125} + Q_{225} - 30 = 0$$

$$Q_{1w5} + Q_{2w5} - Q_w = 0$$

Para o caso estudado as trocas entre o fluxo quente 1 e o fluxo frio 1 não podem ocorrer, portanto $Q_{111}=Q_{112}=Q_{113}=0$. Além disso, junto com os balanços de calor em cada intervalo, todas as trocas exceto Q_{111} , Q_{112} e Q_{113} devem ser especificados maiores ou iguais a zero na formulação matemática do problema.

ANEXO D - Fórmulas inseridas na janela de restrições do *Solver* para otimização de sistemas em rede de trocadores de calor.

Intervalo 1:

$$\text{Célula E7:} = B3 - B16 - B5$$

$$\text{Célula E8:} = B16 + B23 - 108$$

$$\text{Célula E9:} = B23 + B9 - 78$$

Intervalo 2:

$$\text{Célula E13:} = B5 - B6 - B17 - B18$$

$$\text{Célula E14:} = B9 + 26 - B10 - B24 - B25$$

$$\text{Célula E15:} = 44 - B13 - B30 - B31$$

$$\text{Célula E16:} = B17 + B24 + B30 - 36$$

$$\text{Célula E17:} = B18 + B25 + B31 - 30$$

Intervalo 3:

$$\text{Célula E21:} = B6 - B7 - B19 - B20$$

$$\text{Célula E22:} = B10 + 182 - B11 - B26 - B27$$

$$\text{Célula E23:} = 308 + B13 - B14 - B32 - B33$$

$$\text{Célula E24:} = B19 + B26 + B32 - 252$$

$$\text{Célula E25:} = B20 + B27 + B33 - 210$$

Intervalo 4:

$$\text{Célula E29:} = B7 - B21 - B8$$

$$\text{Célula E30:} = B11 + 52 - B28 - B12$$

$$\text{Célula E31:} = B14 + 88 - B34 - B15$$

$$\text{Célula E32:} = B21 + B28 + B34 - 60$$

Intervalo 5:

$$\text{Célula E36:} = B8 - B22$$

$$\text{Célula E37:} = B12 - B29 - B36$$

$$\text{Célula E38:} = B15 + 44 - B35 - B37$$

$$\text{Célula E39:} = B22 + B29 + B35 - 30$$

$$\text{Célula E40:} = B36 + B37 - B4$$

ANEXO E - Restrições para o *Solver* na otimização da sequência de destilação.

$$F_k \geq 0:$$

$$\begin{aligned} & \$B\$3 \geq 0; \$B\$4 \geq 0; \$B\$5 \geq 0; \$B\$6 \geq 0; \$B\$7 \\ & \geq 0; \$B\$8 \geq 0; \$B\$9 \geq 0; \$B\$10 \geq 0; \$B\$11 \\ & \geq 0; \$B\$12 \geq 0. \end{aligned}$$

y_k = binary variable

$$\begin{aligned} & \$F\$3 = \text{binario}; \$F\$4 = \text{binario}; \$F\$5 \\ & = \text{binario}; \$F\$6 = \text{binario}; \$F\$7 \\ & = \text{binario}; \$F\$8 = \text{binario}; \$F\$9 \\ & = \text{binario}; \$F\$10 = \text{binario}; \$F\$11 \\ & = \text{binario}; \$F\$12 = \text{binário}. \end{aligned}$$

Equation (2)–(7)

$$\begin{aligned} & \$B\$16 = 0; \$B\$17 = 0; \$B\$18 = 0; \$B\$19 = 0; \$B\$20 \\ & = 0; \$B\$21 = 0. \end{aligned}$$

Equation (8-17)

$$\begin{aligned} & \$D\$16 \leq 0; \$D\$17 \leq 0; \$D\$18 \leq 0; \$D\$19 \\ & \leq 0; \$D\$20 \leq 0; \$D\$21 \leq 0; \$D\$22 \\ & \leq 0; \$D\$23 \leq 0; \$D\$24 \leq 0; \$D\$25 \leq 0. \end{aligned}$$