



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MIKAELLY CABRAL DE SOUSA

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CAFÉ DESCAFEINADO
UTILIZANDO O SOFTWARE DWSIM

FORTALEZA

2023

MIKAELLY CABRAL DE SOUSA

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CAFÉ DESCAFEINADO
UTILIZANDO O SOFTWARE DWSIM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Ivanildo José da Silva Junior.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S697a Sousa, Mikaelly Cabral de.
Análise e simulação da produção de café descafeinado utilizando o software DWSIM / Mikaelly Cabral de Sousa. – 2023.
47 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Ivanildo José da Silva Junior.

1. Cafeína. 2. Descafeinação. 3. Extração. 4. DWSIM. I. Título.

CDD 660

MIKAELLY CABRAL DE SOUSA

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CAFÉ DESCAFEINADO UTILIZANDO
O SOFTWARE DWSIM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ivanildo José da Silva Junior (Orientador)

Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Andréa da Silva Pereira

Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Sebastião Mardônio Pereira de Lucena

Universidade Federal do Ceará

À minha família e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Aos meus tios, Célia e Lourenço e a minha mãe Solange pelo incentivo e força até hoje. Por me concederem o que há de melhor e por todo amor e carinho ao longo dessa jornada.

A minha tia, Sueli pelo carinho compartilhado e pelo amor incondicionado.

Ao meu marido, José Wilson pela parceria e companheirismo ao longo dessa longa jornada.

Ao meu querido orientador, professor Ivanildo, pela paciência, amizade e apoio durante toda a graduação e, principalmente, por acreditar em mim.

Aos meus amigos de laboratório, Juliene, Mairlane e Renata, por todo apoio fornecido e pela experiência compartilhada.

Aos meus amigos que conquistei durante o primeiro ano de graduação que escolherem permanecer ao meu lado e compartilhar durante todo o cursar de Engenharia Química, compartilhando dores e felicidade, Yasmim, Nayara, Maria Mariana, Thalita, Gabriela, Wanderson, Diony.

Aos meus amigos de vida, Ananda, Waleska e Rebeca.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, por ter proporcionado meu crescimento pessoal e profissional, pela descoberta de novas habilidades e por fomentar o meu amor pelo ensino e pesquisa.

RESUMO

Com o aumento do consumo do café descafeinado por pessoas com algum tipo de doenças crônica ou pela crescente porcentagem de jovens e adultos em busca de um estilo de vida mais saudável, a indústria do café incluiu em seu catálogo o café descafeinado para atender este novo perfil de consumidor. Entretanto, as técnicas de remoção da cafeína empregadas afetavam as principais características do café, tornando-o um produto de baixa qualidade e de custos levados. Tendo em vista que hoje no Brasil existem poucas indústrias de descafeinação, o presente trabalho tem como objetivo elaborar um projeto industrial de descafeinação do grão verde de café utilizando CO₂ supercrítico como solvente extrator da cafeína, por meio da simulação no software DWSIM, bem como verificar a viabilidade econômica da implantação deste projeto. Na simulação da planta de extração supercrítica, foi considerado a utilização de 1000g de café verde alimentado em batelada, sendo passada uma corrente de CO₂ supercrítica a uma vazão 0,126Kg/h durante 1 hora. Foram selecionados os equipamentos necessários para a instalação da planta, chegando a um Investimento inicial de R\$ 100.000,00 e com custo de produção de R\$ 665.000,00. O projeto se mostrou viável devido aos seus resultados do Valor Presente líquido e da Taxa Interna de Rentabilidade, fatores que influenciam no sucesso do projeto.

Palavras-chave: Cafeína; Descafeinação; Extração; DWSIM.

ABSTRACT

With the increase in consumption of decaffeinated coffee by people with some type of chronic illness or by the growing percentage of young people and adults in search of a healthier lifestyle, the coffee industry has included decaffeinated coffee in its catalog to meet this new profile of consumer. However, the caffeine removal techniques employed affected the main characteristics of the coffee, making it a low-quality and costly product. Considering that today in Brazil there are few decaffeination industries, the present work aims to elaborate an industrial project for decaffeination of green coffee beans using supercritical CO₂ as a caffeine extracting solvent, through simulation in the DWSIM software, as well as verify the economic feasibility of implementing this project. In the simulation of the supercritical extraction plant, the use of 1000g of green coffee fed in batch was considered, with a current of supercritical CO₂ being passed at a flow rate of 0.126Kg/h for 1 hour. The necessary equipment for the installation of the plant was selected, reaching an initial investment of R\$ 100,000.00 and a production cost of R\$ 665,000.00. The project proved to be viable due to its Net Present Value and Internal Rate of Return results, factors that influence the success of the project.

Keywords: Caffeine; Decaffeination; Extraction; DWSIM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura química da cafeína	14
Figura 2: Fluxograma de descafeinação por água.....	18
Figura 3: Estrutura molecular do dióxido de carbono	20
Figura 4: Corrente de alimentação de CO ₂	23
Figura 5: Fluxograma do processo de descafeinação	24
Figura 6: Extrator	30
Figura 7: Simulação DWSIM	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades da cafeína	15
Tabela 2: Solubilidade da cafeína em diferentes solvente	16
Tabela 3: Propriedades críticas dos solventes.....	19
Tabela 4: Propriedades do dióxido de carbono.....	20
Tabela 5: Propriedade CO2 supercrítico.....	22
Tabela 6: Extração da cafeína	23
Tabela 7: Dimensionamento do tanque de alimentação	26
Tabela 8: Dimensionamento do compressor.....	27
Tabela 9: Parâmetros utilizado calcular a carga térmica	28
Tabela 10: Dimensionamento do trocador de calor	28
Tabela 11: Dimensionamento do extrator.....	29
Tabela 12: Composição do café.....	30
Tabela 13: Corrente de saída do extrator (Topo).....	31
Tabela 14: Corrente de saída do extrator (Fundo).....	31
Tabela 15: Vazão de alimentação do fluido supercrítico.....	31
Tabela 16: Cotação	35
Tabela 17: Análise de viabilidade econômica	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OMS	World Health Organization
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
INMETRO	National Institute of Metrology, Standardization and Industrial Quality
ANVISA	National Health Surveillance Agency
CNTP	Normal Temperature and Pressure Conditions
TIR	Internal Rate of Return
VPL	Net Present Value
TMA	Minimum Attractiveness Rate
PIS	Social Integration Program
COFINS	Contribution to Social Security Financing
CDI	Interbank Deposit Certificate

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. Cafeína	14
2.2. Problemas associados ao consumo de cafeína	15
2.3. Descafeinação	16
2.3.1. Descafeinação por solvente orgânico.....	16
2.3.2. Descafeinação por água.....	17
2.3.3. Descafeinação por fluidos supercríticos.....	18
2.3.3.1. <i>Descafeinação por CO₂ supercrítico</i>	19
3. METODOLOGIA	22
3.1. Considerações sobre o processo de produção	22
3.2. Modelo de produção	22
3.3. Fluxograma do processo no simulador	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1. Recebimento, armazenamento e manuseio da matéria prima	25
4.2. Processo de descafeinação	25
4.3. Dimensionamento dos equipamentos	25
4.3.1. Tanque de alimentação de CO ₂	25
4.3.2. Compressor.....	26
4.3.3. Trocador de calor casco e tubo.....	27
4.3.4. Extrator.....	28
4.3.5. Determinação do volume.....	29
4.4. Simulação	30
4.5. Custo dos equipamentos	34
4.5.1. Investimento inicial.....	34
4.5.2. Viabilidade econômica.....	35
5. CONCLUSÃO	39
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	40
REFERÊNCIAS	41
ANEXO	45

1. INTRODUÇÃO

A cafeína é uma substância classificada como alcaloide pertencente ao grupo das xantinas, que ocorre naturalmente nas folhas de chá verde e erva-mate, nas sementes de cacau e guaraná, sendo sua principal fonte as sementes de café, onde foi identificada pela primeira vez em 1819 (GUERRA *et al.*, 2000).

De acordo com o Ministério da Agricultura e Pecuária (2023), o café tornou-se uma das bebidas mais consumidas mundialmente sendo o segundo produto mais comercializado no mercado internacional com baixo valor nutricional e estimulante do sistema nervoso central. Devido a pandemia houve uma queda no consumo do café, mesmo assim, o Brasil fica atrás apenas dos Estados Unidos quanto ao consumo desse produto, conforme dados divulgados pela Associação Brasileira da Indústria de Café (2022).

A cafeína segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) é classificada como uma droga devido aos seus efeitos estimulantes, sendo capaz de modificar as funções do nosso organismo aumentando a atividade cerebral, além de causar dependência quando consumidos de forma excessiva (GUERRA *et al.*, 2000). No entanto, não há um consenso a respeito do consumo do café e da cafeína em relação aos seus benefícios e malefícios. Segundo estudos realizados por Brenelli (2003), o consumo diário de cafeína em grande quantidade pode causar sintomas de dependência, como dores de cabeça, mudanças de humor, insônia, alterações na flora intestinal e palpitações no coração. Já para Bjelica *et al.* (2003), o consumo do café e da cafeína está relacionado à melhoria na concentração, no desempenho físico de atletas e no seu potencial antioxidante reduzindo os riscos de incidência de doença de Parkinson e de câncer.

Oliveira (2009) identificou que o aumento do consumo do café descafeinado não está atrelado somente a pessoas com idade avançada ou com algum tipo de doença crônica, mas também a pessoas que estão em busca de um estilo de vida mais saudável.

Existem diversos métodos utilizados para produção de café descafeinado, no entanto a descafeinação por meio do CO₂ supercrítico como solvente alternativo aos processos tradicionais garante um produto de maior qualidade, mantendo os principais constituintes do aroma e do sabor do café, sem resíduos tóxicos provenientes do material extrator (MARANHÃO, 2019).

Este trabalho tem como objetivo simular o processo de produção do café descafeinado utilizando o software DWSIM, um simulador de processos químicos industrial. Com a finalidade de avaliar a implantação de uma unidade de descafeinação em fábricas que não possuem este processo.

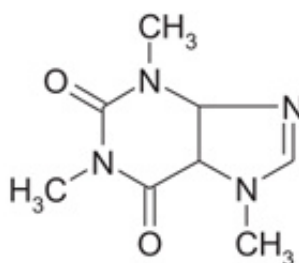
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cafeína

A cafeína é um composto químico de fórmula molecular $C_8H_{10}N_4O_2$, com nome oficial de 1,3,7-trimetil-1H-purino-2,6(3H,7H)-diona, segundo a nomenclatura da IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), cuja estrutura pode ser observada na Figura 1.

É encontrada em mais de 60 tipos de plantas, sendo considerada a substância psicoativa mais consumida no mundo (GLASS, 1994). Quando isolada e purificada apresenta-se na forma de um pó branco de sabor amargo, podendo ser aplicado em alimentos, bebidas e fármacos (AZEVEDO, 2005).

Figura 1: Estrutura química da cafeína



Fonte: Monteiro e Trugo (2005)

Entre os grupos das xantinas, a cafeína é a que mais tem influência sobre o sistema nervoso central, atuando no metabolismo basal e aumentando a produção de suco gástrico, bem como aumentando a capacidade produtiva de trabalho e dilatando os vasos sanguíneos (BJELICA *et al.*, 2023).

Dependendo do método de extração, a cafeína pode ser comercializada na forma anidra ou monohidratada, com ponto de fusão e sublimação de 238°C e 178°C, respectivamente. O composto é solúvel em água a temperatura ambiente e em outros solventes em diferentes temperaturas (MAZZAFERA, 1991). As principais características desta molécula podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades da cafeína

Propriedades	Valores
Ponto de ebulição (K)	628,2
Volume molar a 298K (mL.mol ⁻¹)	144
Densidade (g.cm ⁻³)	1,321-1333
Espectro de absorção UV em água (nm)	273-280
Ponto de sublimação (K)	451
Ponto de fusão (K)	508-511
Entalpia de fusão	21118
pKa	14

Fonte: Maranhão,2019

2.2 Problemas associado ao consumo de cafeína

A utilização da cafeína se dá principalmente para a melhora na concentração na realização de atividades do cotidiano, bem como a melhora no desempenho físico estimulando o sistema cardiovascular. No entanto, essa substância também atua sobre os neurônios, alterando o humor e a cognição, gerando dependência ou até mesmo intoxicação, colocando em risco a vida das pessoas (BJELICA *et al.*, 2023).

Com o aumento do consumo da cafeína, pesquisas vêm sendo realizadas acerca dos seus efeitos, mas não há um consenso entres os resultados. Segundo De Maria e Moreira (2007) e Alves, Casal e Oliveira (2009), o consumo da cafeína afeta negativamente nosso sistema motor, diminui a qualidade do sono, causando dores de cabeça, dificuldade em manter a concentração, além de aumentar os sintomas de irritabilidade, ansiedade e depressão. Em contrapartida, há estudos que apontam os efeitos benéficos de sua ingestão, entre elas estão o controle da diabetes tipo II, asma, cirrose alcoólica, doença de Parkinson, Alzheimer e alguns tipos de câncer (ALVES, 2009).

Sabe-se que não existe um nível mínimo ou máximo que seja tolerado pelo sistema nervoso central e que ao longo da vida o consumidor mantém os níveis de consumo, e que seus efeitos são mais fracos que estas drogas (REIS *et al.*, 2001, apud MARANHÃO, 2019).

2.3 Descafeinação

Atualmente o café descafeinado corresponde a cerca de 15% do consumo mundial do café (ESQUIVEL, 2012), sendo a América do Norte e a Europa os mercados mais consumidores (REUTERS, 2023). Segundo normas do INMETRO de 2012, resolução RDC n° 277 da Anvisa, o valor máximo permitido de cafeína em produtos descafeinados tipo grão é de 0,1% (g/100g) e produtos descafeinado tipo solúvel é de 0,3% (g/100g).

Na produção do café descafeinado os métodos mais empregados são: o método de extração por solventes orgânicos, o método de extração por água e o método de extração por dióxido de carbono. Todos os métodos são feitos no grão verde de café antes do processo de torrefação. Uma visão geral de cada métodos de extração será apresentado a seguir.

2.3.1 Descafeinação por solvente orgânico

O processo de produção do café descafeinado utilizados nas indústrias, baseia-se na remoção da cafeína por meio de diferentes tipos de solventes, como: diclorometano, clorofórmio, etanol, metanol, acetona, benzeno, acetato de etila, entre outros que podem ser observados na Tabela 2 de solubilidade (MARANHÃO,2019).

Tabela 2: Solubilidade da cafeína em diferentes solvente

Solvente	Temperatura (K)	Solubilidade (g/100g de solvente)
Etanol 95%	298,15	1,32
Etanol	298,15	1,88
Acetato de etila	291,15	0,73
Metanol	298,15	1,14
Acetona	303,65	2,32
Benzeno	291,15	0,91
Tetracloroeto de carbono	291,15	0,91
Clorofórmio	290,15	12,9
Éter etílico	291,15	0,12
Éter de petróleo	288,18-290,15	0,03
Tricloroetileno	288,15	0,76

Dicloroetileno	288,15	1,82
Tolueno	298,15	0,59
Diclometano	306,15	9

Fonte: Clarke & Macrae, 1985.

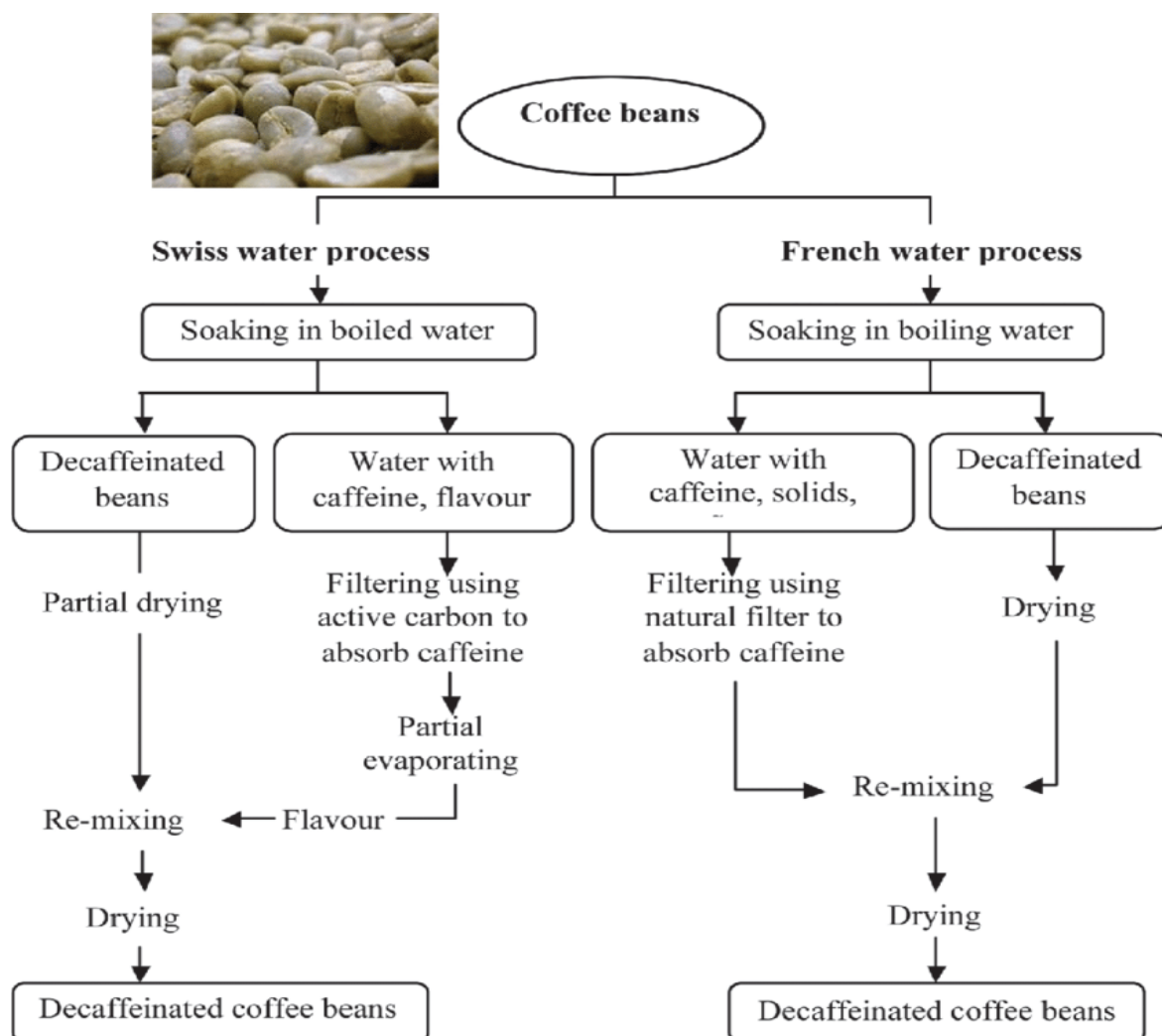
A obtenção dos alcaloides pode ser feita por dois métodos, o método direto que consiste em colocar o grão de café em contato com o solvente extrator por um certo período para que ocorra a extração da cafeína, logo após esta etapa o solvente é vaporizado e o grão seco está pronto para comercialização, e o método indireto que consiste no pré-cozimento a vapor, para que o grão seja umedecido e expandido para que o solvente permeie com mais facilidade promovendo melhor extração (FRANÇA, 2015). Entretanto, a extração direta mostrou-se lenta e de baixa eficiência quando comparada ao método indireto, e, além disso, são métodos que contribuem para formação de resíduos tóxicos (AZEVEDO, 2005).

2.3.2 Descafeinação por água

Neste processo, o grão é imerso em água quente e depois seco, porém, além da remoção da cafeína, outras substâncias que dão o sabor e aroma característico ao café são removidos devido à baixa seletividade da água (AZEVEDO, 2005). A água é um excelente solvente por não gerar resíduos indesejáveis, por esse motivo foi desenvolvido métodos de aperfeiçoamento desta técnica na Suíça e na França denominados de “Swiss Water Decaffeination e French Water Decaffeination”.

A água utilizada para a remoção da cafeína passa por um filtro, onde o alcaloide é retido e a água remanescente com os compostos solúveis do café é reutilizada para absorção destes compostos no grão de café, fazendo com que os grãos de café permaneçam com seus principais constituintes, conforme mostrado na Figura 2 do fluxograma dos dois processos.

Figura 2: Fluxograma de descafeinação por água



Fonte: (Quan Vuong; Paul Roach, 2014)

2.3.3 Descafeinação por fluidos supercríticos

O fluido supercrítico é qualquer substância que, sob temperatura e pressão acima do ponto crítico, não existe distinção entre as fases líquida e gasosa, que pode se difundir no sólido como um gás e dissolver partículas com um líquido. Além disso, qualquer variação na temperatura e na pressão crítica gera grandes mudanças em sua densidade (JOBACK *et al.*, 1987).

A Tabela 3 apresenta algumas substâncias que são comumente utilizadas como fluido supercrítico na indústria.

Tabela 3: Propriedades críticas dos solventes

Solvente	Temperatura crítica (°K)	Pressão crítica (MPa)	Densidade crítica (g/cm ³)
Dióxido de carbono	304,1	7,38	0,469
Água	647,09	22,06	0,322
Metanol	190,4	4,6	0,162
Etanol	305,4	4,87	0,203
Propano	369,8	4,25	0,217
Etileno	282,4	5,04	0,215
Propileno	364,9	4,6	0,232
Metanol	512,6	8,09	0,275
Etanol	513,9	6,14	0,276
Acetona	508,1	4,7	0,278

Fonte: Joback *et al.*, 1987

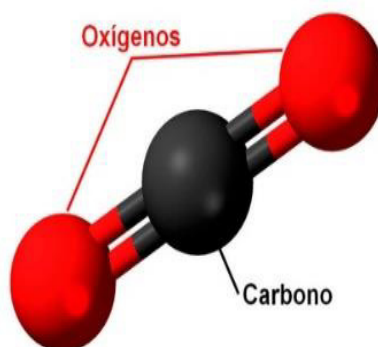
Uma das propriedades mais importante é a solubilidade do material no fluido, que pode ser controlada aumentando a pressão do sistema a uma temperatura constante, fazendo com que a densidade do fluido aumente e conseguintemente melhore o processo de extração (SALDAÑA, 1997). Em relação a temperatura, esta é uma propriedade mais complicada de ser controlada.

2.3.3.1 Descafeinação por CO₂ supercrítico

O método que utiliza o dióxido de carbono como fluido supercrítico no processo de descafeinação do grão de café verde foi desenvolvido por Kurt Zosel em 1974. Em comparação aos outros métodos tradicionais, este é o que mais garante a qualidade do produto descafeinado, mantendo o aroma e o sabor original do café, sem nenhum tipo de contaminante remanescente no grão (MARANHÃO, 2019).

O CO₂ é uma molécula apolar de geometria linear, como apresentando na Figura 3, é um gás inerte, de baixo custo e de fácil obtenção, com ponto crítico relativamente baixo, incolor, não inflamável e não tóxico (LEAL, 2013).

Figura 3: Estrutura molecular do dióxido de carbono



Fonte: Fapesp, 2023

Na Tabela 4 são apresentas algumas propriedades do CO₂ nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

Tabela 4: Propriedades do dióxido de carbono

Propriedade do dióxido de carbono	
Fórmula molecular	CO ₂
Peso molecular	44,01 mol/g
Densidade em relação ao ar 0 °C e 1 atm	1,529
Massa específica do gás a 0 °C e 1 atm	1,977 kg/m ³
Volume específico do gás a 0 °C e 1 atm	0,506 m ³ /kg
Massa específica do líquido a 0 °C e 1 atm	1034 kg/m ³
Massa específica do sólido saturado a 1 atm	1562 kg/m ³
Ponto triplo	-56,6°C e 5,12 atm
Ponto crítico	31,6°C e 73,7 atm
Temperatura de sublimação	78,5 °C
Calor específico a pressão constante	0,111 kcal/kg
Calor específico a volume constante	0,083 kcal/kg
Calor latente de sublimação a 1 atm	136,4 kcal/kg
Calor específico médio a pressão constante (1 atm, -50 a 20 °C)	0,19 kcal/kg·°C
Viscosidade do gás a 21 °C e 1 atm	0,015 cp
Viscosidade do líquido a 21 °C e 1 atm	0,14 cp

Fonte: Leal, 2013

Segundo estudos realizados por Saldaña (1997) e Azevedo (2005), o processo deve ocorrer entre 8 e 30 Mpa e entre 313,15 e 363,15 K, onde os grãos inteiros de café são alimentados ao extrator e submetidos a um fluxo constante de CO₂ supercrítico, que arrasta as partículas de cafeína permanecendo somente o grão descafeinado no extrator com o teor de cafeína reduzido (SALDAÑA,1997).

3. METODOLOGIA

3.1 Considerações sobre o processo de produção

Com base em experimentos realizados por Saldaña (1997), iremos simular o processo de produção do café descafeinado a partir dos dados e resultados experimentais, para averiguar a remoção da cafeína no software DWSIM versão 8.4.3. Embora este software negligencie alguns aspectos importantes de transferência de massa entre sólido e gases, a escolha se deu pela sua acessibilidade frente ao demais software utilizados para simulação industrial.

O trabalho em questão, realizou experimentos para determinar a solubilidade da cafeína e de outros constituintes do café em CO₂ supercrítico a 313, 323 e 343 K, e pressões variando entre 9,5 e 23,5 Mpa, com o auxílio de equipamentos que permite o controle da temperatura e da pressão, verificando que a solubilidade da cafeína no CO₂ supercrítico aumenta com a pressão e diminui com temperatura, revelando que a melhor condição de trabalho é de 323K e 15Mpa, pois nessa temperatura e pressão apresenta um bom rendimento de remoção da cafeína com custos de energia mais reduzidos.

3.2 Modelo de produção

Inicialmente foram coletados os dados necessários para a execução da simulação, como a composição do grão de café verde e a presença da molécula no simulador ou a possível criação dos componentes. Para os dados dos CO₂ supercrítico na temperatura e pressão de 323K e 15Mpa, foi utilizado a tabela termodinâmica disponível NIST, conforme valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Propriedade CO₂ supercrítico

Dados do Fluido Supercrítico	
Temperatura (K)	323
Pressão (MPa)	15
Densidade (mol/L)	15,93
Volume (L/mol)	0,062774
Eneegia Interna	12,857
Entalpia (Kj/mol)	13,799
Entropia	58,723
Cv (J.mol*K)	41,531
Cp (J.mol*K)	133,93
Viscosidade(uPa*s)	56,941

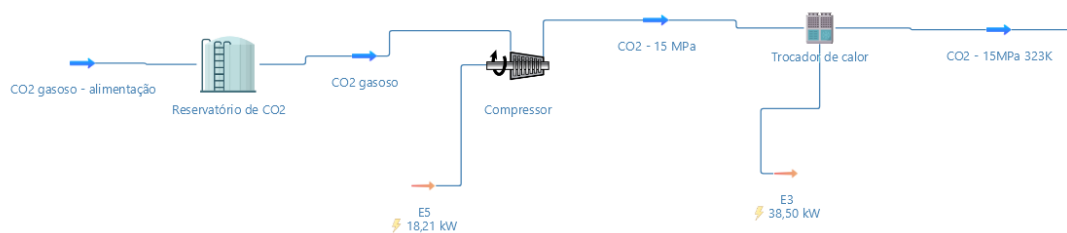
Fonte: Autoria própria

C_p - Calor específico a pressão constante

C_v - Calor específico a volume constante

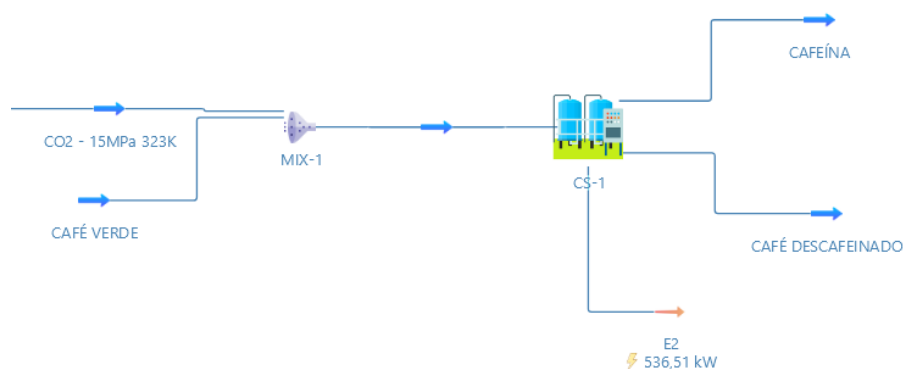
Foram selecionadas duas correntes de vazão de alimentação, uma tendo a alimentação CO_2 supercrítico e a segunda com alimentação do grão de café verde. Somente a corrente contendo CO_2 foi submetida ao aumento de pressão pelo compressor e resfriada através de um trocador de calor conforme mostra a Figura 4, e então misturada a corrente de café verde de maneira que em fossem adicionadas ao separador de componentes por meio de um misturador de correntes, que melhor representou o processo de extração de um reator extrator, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 4: Corrente de alimentação de CO_2



Fonte: Autoria própria

Tabela 6: Extração da cafeína

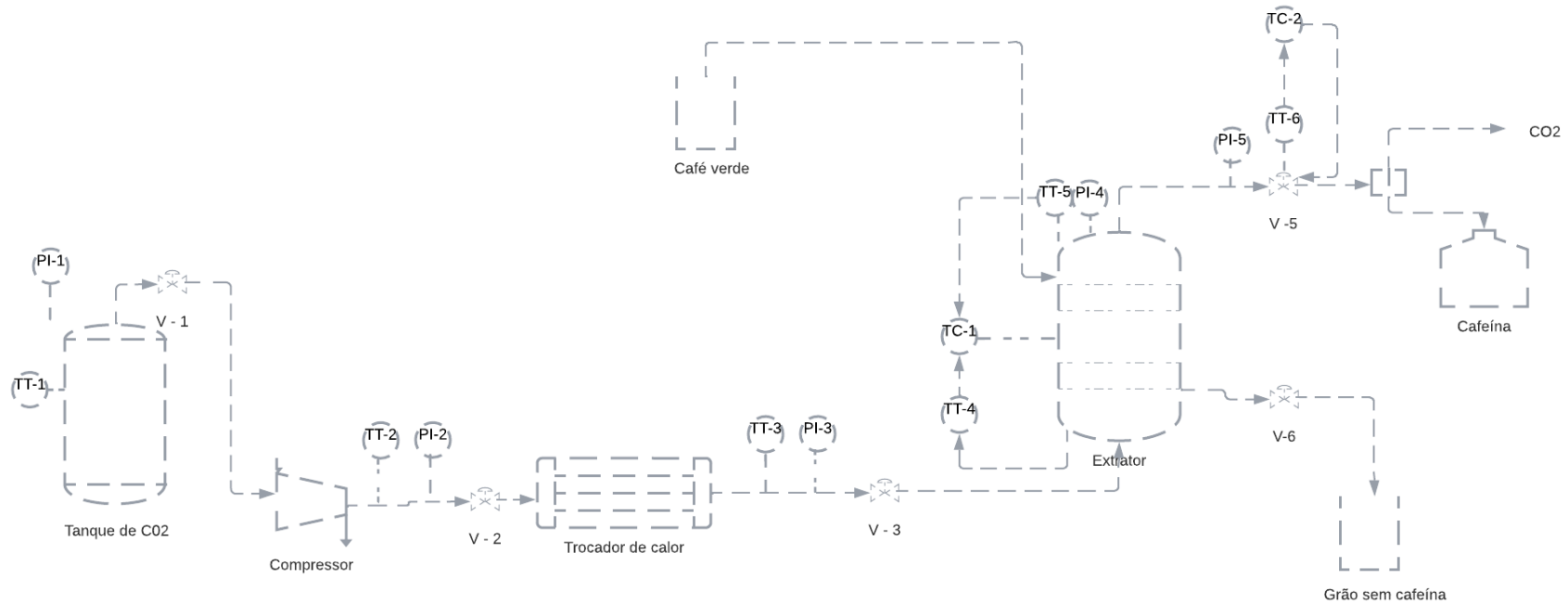


Fonte: Autoria própria

3.3 Fluxograma do processo no simulador

A Figura 7 mostra o processo completo de descafeinação utilizando CO_2 supercrítico como solvente extrator, com os principais acessórios de controle do sistema.

Figura 5: Fluxograma do processo de descafeinação



Legenda

Fonte: Autoria própria

Equipamentos	Válvulas	Instrumentos
Tanque de CO2	V-1 Válvula de bloqueio	TT-1 Transmissor de temperatura
Compressor	V-2 Válvula de bloqueio	TT-2 Transmissor de temperatura
Trocador de calor	V-3 Válvula de retenção	TT-3 Transmissor de temperatura
Extrator	V-4 Válvula de bloqueio	TT-4 Transmissor de temperatura
	V-5 Válvula de retenção	TT-5 Transmissor de temperatura
	V-6 Válvula de bloqueio	TT-6 Transmissor de temperatura
		TC-1 Controlador de temperatura
		TC-2 Controlador de temperatura
		PI-1 Indicador de pressão
		PI-2 Indicador de pressão
		PI-3 Indicador de pressão
		PI-4 Indicador de pressão
		PI-5 Indicador de pressão

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Recebimento, armazenamento e manuseio da matéria prima

O processo de descafeinação inicia-se com o recebimento do grão de café verde em Big Bag de 1000 Kg, trazidas em caminhões de várias regiões do país de acordo com o tipo de café a ser produzido. Nas esteiras, estes serão pesados e transportados para o galpão de armazenamento e mantidos em temperatura ambiente e protegidos da umidade.

Após o recebimento, o grão deve passar por algumas análises físicas e químicas para garantir o controle de qualidade do produto seguindo as legislações da Anvisa e os critérios de certificações da ABIC como: Teor de umidade, teor de microtoxinas, análise granulométrica, análise de contaminantes e análise microbiológica.

4.2 Processo de descafeinação

O CO₂ gasoso armazenado no tanque cilíndrico é alimentado ao extrato por meio de um compressor que aumenta a pressão do gás (acima da pressão crítica), que logo após passa por um refrigerador para atingir a temperatura crítica de operação. O CO₂ agora em estado supercrítico é injetado no tanque extrator junto ao café, que é alimentado em batelada para a remoção da cafeína.

A cafeína extraída é separada do solvente reduzindo a pressão e temperatura do sistema, liberando o CO₂ na forma de gás para a atmosfera. Enquanto a cafeína livre de CO₂, é obtida em estado sólido com um certo grau de impurezas que possui um grande valor agregado para indústrias que comercializam a cafeína em alimentos e bebidas.

O grão descafeinado é armazenado em Big Bag de 1000kg que serão utilizadas no processo de torra e moagem, envase e comercialização.

4.3 Dimensionamento dos equipamentos

4.3.1 Tanque de alimentação de CO₂

Com base na relação definida por (AZEVEDO, 2005), para a obtenção do fluxo de extração da cafeína por CO₂ supercrítico, são necessários aproximadamente 126,03g de CO₂ para remover 75% da cafeína presente em 1kg de café verde em um período de 60 minutos.

Para que o sistema possa operar continuamente a uma vazão constante, devemos dimensionar um tanque de alimentação com estoque de CO₂ para 180 dias a partir dos dados fornecidos pela Tabela 7:

$$VAZÃO = \frac{MASSA DE CO_2}{TEMPO DE OPERAÇÃO} \quad (1)$$

$$VAZÃO = 0,126 \text{ Kg/h} \quad (2)$$

$$VOLUME DO TANQUE = \frac{VAZÃO}{\rho CO_2} * 180 \text{ dias} * 24h = 275,32 \text{ m}^3 \quad (3)$$

Tabela 7: Dimensionamento do tanque de alimentação

Tanque de alimentação de CO ₂	
Vazão (kg/h)	0,126
ρ_{CO_2} (kg/m ³) – 25°C	1,977
Volume Tanque (m ³)	275,32

Fonte: Autoria própria

ρ – Densidade

4.3.2 Compressor

O compressor deve ser posicionado na saída do tanque de alimentação de CO₂. Este equipamento é responsável por elevar a pressão do gás de 2,53 MPa para 15 Mpa (SALDAÑA, 1997), à uma vazão constante e eficiência igual ou superior a 75%. Com base nos dados fornecidos pela Tabela 8 e na vazão volumétrica do sistema, é possível estimar a potência necessária para que o compressor realize o transporte e compressão do gás pela seguinte equação, onde:

Hc – Entalpia específica;

R – Constante dos gases;

T – Temperatura de entrada;

P – Pressão de entrada e de saída;

y – Coeficiente adiabático Cp/Cv;

POT – Potência do compressor;

Q – Vazão de entrada do CO₂;

η – Eficiência do compressor.

$$Hc = \frac{R T_{ENT}}{MM} \left[\frac{\left(\frac{P_{ENT}}{P_{SAI}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = 122,81 \frac{KJ}{Kg} \quad (4)$$

$$POT = \frac{\rho * Q * Hc}{\eta} = 64750,85 \frac{KJ}{h} \quad (5)$$

Tabela 8: Dimensionamento do compressor

Compressor	
Const. dos gases (J/mol*K)	8,31
Temperatura de entrada (K)	293
Pressão de entrada (Bar)	25,33
Pressão de saída (Bar)	150
y	1,316
Massa molar (Kg/Kmol)	44,01
Eficiência do compressor	75
Q(m3/s)	5,82

Fonte: Aatoria própria

4.3.3 Trocador de calor casco e tubo

Para o dimensionamento do trocador de calor tipo casco e tubo, foi considerado que o fluido que passa no casco é a água e o fluido que passa no tuno é o CO₂ supercrítico, levando em consideração o método ΔTML , para determinação da carga térmica do trocador.

Para a determinação dos demais parâmetros do trocador de calor é necessário realizar a correção da temperatura pelo fator Farkheri, bem como estimar os coeficientes de troca térmica, fator de atrito, regime de escoamento, queda de pressão entre outros.

Na Tabela 9, podemos verificar os resultados obtido para a troca térmica e seus demais parâmetros:

1. Temperaturas de entrada e saída;
2. Vazão de entrada (w);
3. Capacidade calorífica (cp);
4. Viscosidade (μ);
5. Densidade (ρ);

6. Constante k ;
7. Número de Prandtl (Pr);
8. Carga térmica (q).

Tabela 9: Parâmetros utilizado calcular a carga térmica

Fluido no casco		Fluido no tubo	
Corrente 1 (kg/s)	3,50E-05	Corrente 2 (kg/s)	1,77E-06
Temperatura de entrada (K)	486,359	Temperatura de entrada (K)	298
Temperatura de saída (K)	323	Temperatura de saída (K)	571
ΔT médio (K)	404,6795	ΔT médio (K)	312,797
cp_1 (J/kg.K)	37,564	cp_2 (J/kg.K)	4100
μ_1 (Pa.s)	0,00004	μ_2 (Pa.s)	0,0006
ρ_1 (kg/m ³)	0,468	ρ_2 (kg/m ³)	1045
k (w/mK)	0,11	k (w/mK)	0,64
pr	0,005483	pr	4
q_1 (W)	-0,214777	q_2 (W)	0,21477

Fonte: Autoria própria

Considerar um trocador de calor casco e tubo de aço carbono com o diâmetro interno e externo de 16,1 mm e 19,5 mm respectivamente, obtemos uma área de troca térmica de 0,698 m², conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 10: Dimensionamento do trocador de calor

Trocador de calor	
Área de troca térmica (m ²)	0,698
Comprimento do tubo (m)	1,15
Área total (m ²)	5,17
Número de grampos	6

Fonte: Autoria própria

As equações utilizadas para o cálculo do dimensionamento do trocador encontram-se no anexo deste trabalho.

4.3.4 Extrator

Para o balanço de massa no extrator, utilizamos a correlação obtida por (SALDAÑA, 1997), que constatou que para cada 1g de café verde encontrasse 35 mg de cafeína. Ou seja,

em 1 kg de café verde podemos obter até 35g de cafeína, a uma vazão constante de CO₂ supercrítico durante 60 min de extração. Os valores do balanço de massa estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Dimensionamento do extrator

Extrator	
Café verde (g)	1000
Cafeína Total (g)	48
Cafeína extraída (g)	35
Cafeína remanescente (g)	13
Eficiência (%)	72,9167
CO ₂ (g)	126,03
Vazão de CO ₂ (g/min)	2,1
Tempo da extração (min)	60
Pressão (Pa)	2,70E+07
Temperatura (K)	323

Fonte: Autoria própria

4.3.5 Determinação do volume

Para dimensionar o volume do reator, considerou-se que a extração ocorre em um reator semi batelada, com tempo morto para alimentação e descarga dos grãos de aproximadamente 30 min, tempo este estimado a partir de equipamentos que operam nas mesmas condições.

- Tempo morto (t_m): 30 min
- Tempo de extração (t_r): 60 min;
- Número de bateladas por unidade de tempo;

$$N = \frac{1}{t_m + t_r} \quad (6)$$

- Volume da batelada;

$$V_{batelada} = t_r * Q \quad (7)$$

$$V_{reator} = 116,28 \text{ m}^3$$

4.4 Simulação

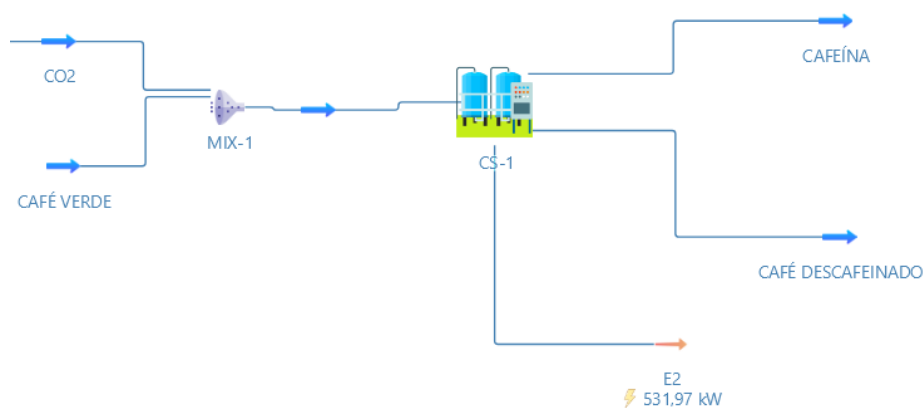
No software DWSIM, a corrente contendo o café verde foi alimentado com os principais componentes presentes no grão obtidas de Halal (2008) que puderam ser encontradas no simulado, conforme mostrado na Tabela 12, mais uma corrente contendo 100% de CO₂ supercrítico, conforme mostrado na Figura 6, do fluxo de entrada e saída do extrator.

Tabela 12: Composição do café

Componentes	Fração molar
Cafeína	0,05064
Água	0,04413
Celulose	0,27485
Sacarose	0,54738
Ácido Clorogênico	0,083

Fonte: Autoria própria

Figura 6: Extrator



Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos na simulação, se apresentaram conforme relatados por Saldaña (1997) em seus experimentos em laboratório. Por mais que a simulação negligencie alguns fatores importantes, como a necessidade de um misturador de correntes antes da entrada no equipamento, a análise e simulação obteve resultados satisfatórios na remoção de cafeína, conforme mostrados nas Tabelas 13 e 14, das correntes de topo e fundo.

Tabela 13: Corrente de saída do extrator (Topo)

Componentes	Fração molar
Cafeína	0,78214
CO ₂	0,21786
Água	0
Celulose	0
Sacarose	0
Ácido Clorogênico	0

Fonte: Autoria própria

Tabela 14: Corrente de saída do extrator (Fundo)

Componentes	Fração molar
Cafeína	0,000748
CO ₂	0,9887
Água	0,000052
Celulose	0,0032
Sacarose	0,0064
Ácido Clorogênico	0,0009

Fonte: Autoria própria

Com a vazão de alimentação de 0,126kg/h de CO₂ supercrítico a remoção da cafeína ficou inferior aos limites estabelecidos pela Anvisa para o grão ser considerado descafeinado, com isso foi preciso estimar um novo valor para vazão de alimentação para obtenção de uma remoção acima de 97%, mostrada na Tabela 15.

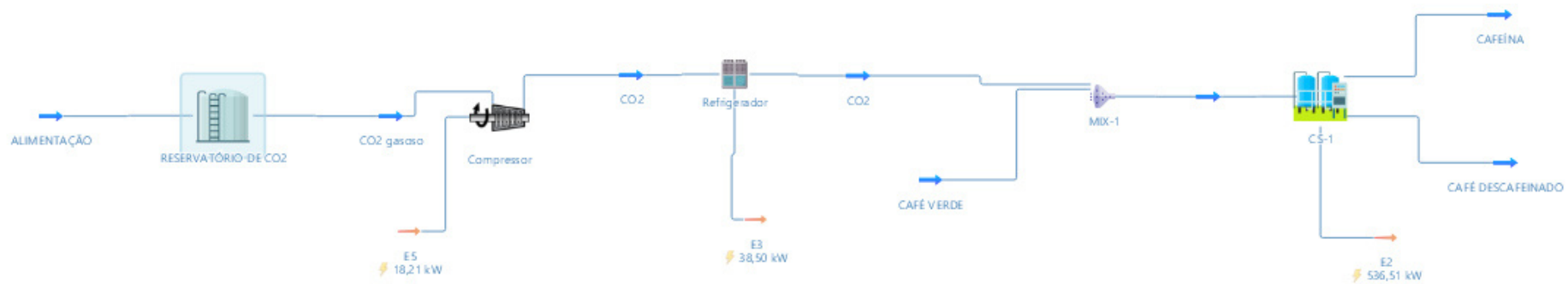
Tabela 15: Vazão de alimentação do fluido supercrítico

Vazão (kg/h)	% Remoção
0,126	73
0,134630137	78
0,143260274	83
0,151890411	88
0,167424658	97
0,169150685	98
0,17260274	100

Fonte: Autoria própria

Na Figura 7, temos o fluxograma completo da simulação no DWSIM, a partir do tanque de alimentação do CO₂, que é alimentado ao compressor para elevar a pressão do sistema e depois resfriado em um trocador de calor, garantindo as condições necessárias para a simulação.

Figura 7: Simulação DWSIM



Fonte: Autoria própria

4.5 Custo dos equipamentos

Para dar início a implantação de uma planta industrial, é necessário um estudo de viabilidade econômica do projeto, começando com o investimento financeiro. Tendo em vista que o processo de descafeinação não precisa estar acoplado ao processo de torra e moagem dos grãos, o café descafeinado pode ser comercializado para outras empresas, bem como a caféina bruta, gerando mais lucro para a empresa.

Para o sucesso de um novo projeto, é necessário um investimento financeiro inicial com equipamentos e instalação, onde estes custos podem ser estimados através de estudos prévios ou cotação junto aos fornecedores, garantido o valor real dos equipamentos sem prejuízos. Para calcular o valor do Investimento Inicial, é preciso saber os custos do Investimento Fixo e do Investimento Operativo.

No qual o Investimento Fixo é o capital necessário para a construção da planta com todos os componentes que não estão relacionados diretamente com o processo de produção e o Investimento Operativo é o dinheiro necessário para a aquisição dos meios da implantação da planta industrial (Lira, 2023).

4.5.1 Investimento inicial

Na Tabela 16 encontra-se a cotação de cada equipamentos com o preço de instalação na planta, sendo os custos estimados com base na média de preço do mercado que se assemelham ao calculados no dimensionamento, obtendo os valores dos seguintes fornecedores:

CIMM – Central de cotação;

Soluções industriais;

Alibaba;

Bailiam Compressors;

Termotek.

Com base no fluxograma do processo demonstrado na Figura 5, foi definido a quantidade de válvulas de controle de fluxo, medidores e controladores de temperatura e pressão, além disso, o tanque de alimentação de CO₂ foi dimensionado para suprir a demanda de 180 dias sendo necessário 3 tanques de para fornecer o volume dimensionado na seção 4.3.1.

Tabela 16: Cotação

Equipamentos	Quantidade	Preço (R\$)	Total (R\$)
Tanque de alimentação de CO2	3	R\$ 186.986,80	R\$ 1.682.881,20
Compressor	1	R\$ 97.136,00	R\$ 97.136,00
Trocador de calor	1	R\$ 72.852,00	R\$ 72.852,00
Extrator	1	R\$ 485.675,14	R\$ 485.675,14
Válvula de retenção	2	R\$ 180,00	R\$ 360,00
Válvula de bloqueio	4	R\$ 550,00	R\$ 2.200,00
Transmissor de temperatura	6	R\$ 1.500,00	R\$ 9.000,00
Controlador de temperatura	2	R\$ 2.500,00	R\$ 5.000,00
Indicador de pressão	5	R\$ 400,00	R\$ 2.000,00
Tubulação	1	R\$ 8.000,00	R\$ 8.000,00
Montagem da planta e insumos		R\$ 50.000,00	R\$ 50.000,00
TOTAL			R\$ 2.415.104,34

Fonte: Autoria própria

4.5.2 Viabilidade econômica

Existem várias formas de ser analisado a viabilidade econômica, no entanto, devem ser considerados alguns dados como o custo de produção, as despesas com a instalação e ampliação da planta durante um certo período, custos com matéria prima, insumos, manutenção dos maquinários, depreciação, salários, gestão, remuneração, venda, entre outros, para que a análise seja mais eficiente.

Os principais impostos a serem pagos são, o PIS, COFINS com valor total de 10,2%, para o Imposto de renda um valor de 32% e CDI de 13,6% com base na tributação do ano de 2023. Para a produção, foram estimados os custos com água e energia de acordo com preço do m³ e do KW/h com a distribuidora da cidade de Fortaleza, para a saca (60 Kg) do grão de café o custo é de R\$ 804,89 na bolsa de valores, além disso, foram estimados alguns valores para folha de pagamento dos funcionários, segurança, treinamento, manutenção e outros materiais para bom funcionamento da empresa.

Levando em consideração que o grão de café descafeinado possa ser comercializado tanto em grãos como torrado e moído já que o projeto em análise é uma ampliação para empresas que produzem o café torrado e moído tradicional, o valor do kg do grão descafeinado sai a 75 reais e do café torrado e moído a 60 reais. Como a cafeína é um subproduto do processo, pode ser comercializado para empresas que utilizem a cafeína como ingrediente para produção

de bebidas energéticas, suplementos ou até mesmo para produção de cápsulas, estimando o preço médio de 1kg da cafeína a R\$ 600,00.

Tendo em vista que o processo de descafeinação ocorre em 90 min, por dia pode ser realizado um total de 12 bateladas para não sobrecarregar o sistema, obtendo-se uma produção mensal de 360kg de café descafeinado e 12,6kg de cafeína pura, sendo metade dos grãos descafeinados destinados ao processo de torra e moagem da própria empresa.

Na Tabela 17 temos o resumo da viabilidade econômica no período de 5 anos, contendo os valores da receita bruta, impostos, receita líquida, custos com produção, depreciação, lucro líquido e lucro livre acumulado.

Tabela 17: Análise de viabilidade econômica

Análise de viabilidade														
Fluxo de caixa	Inicial		1º Ano		2º Ano		3º Ano		4º Ano		5º Ano			
Receita Bruta		R\$	382.320,00	R\$	382.320,00	R\$	382.320,00	R\$	382.320,00	R\$	382.320,00	R\$	382.320,00	
Impostos		R\$	38.805,48	R\$	38.805,48	R\$	38.805,48	R\$	38.805,48	R\$	38.805,48	R\$	38.805,48	
Receita Líquida		R\$	343.514,52	R\$	343.514,52	R\$	343.514,52	R\$	343.514,52	R\$	343.514,52	R\$	343.514,52	
Custos de produção		R\$	30.410.000,00	R\$	30.375.000,00	R\$	30.365.000,00	R\$	30.360.000,00	R\$	30.375.000,00	R\$	30.375.000,00	
Investimentos	R\$	241.510.434,00	R\$	1.343.183,54	R\$	335.795,89	R\$	335.795,89	R\$	335.795,89	R\$	335.795,89	R\$	335.795,89
Depreciação		-R\$	31.409.669,02	-R\$	30.367.281,37	-R\$	30.357.281,37	-R\$	30.352.281,37	-R\$	30.367.281,37	-R\$	30.367.281,37	
Lucro Líquido	-R\$	241.510.434,00	-R\$	31.409.669,02	-R\$	30.367.281,37	-R\$	30.357.281,37	-R\$	30.352.281,37	-R\$	30.367.281,37	-R\$	30.367.281,37
Lucro Livre Acumulado	-R\$	241.510.434,00	-R\$	31.409.669,02	-R\$	61.776.950,39	-R\$	92.134.231,75	-R\$	122.486.513,12	-R\$	152.853.794,48	-R\$	152.853.794,48

Fonte: Autoria própria

Após coletar essas informações, ocorre a análise dos indicadores: Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Mínima de Atratividade (TMA). A Taxa Mínima de Atratividade, representa a rentabilidade mínima para o investimento gerar lucro, ou seja, ser atrativo.

O VPL é a fórmula financeira capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial. Usando esse método, se o valor do VPL for igual a zero, o investimento é indiferente, pois o valor presente das entradas é igual ao valor presente das saídas de caixa; se o VPL for menor que zero, significa que o investimento não é economicamente atrativo, já que o valor presente das entradas é menor que os da saída de caixa; se o valor presente de todas as entradas de caixas menos o valor de todas as saídas de caixa for maior que zero, o investimento é economicamente viável (Lira, 2023).

Para calcular o valor presente de entradas e saídas de caixa, utilizamos a TMA como taxa de desconto, em que se a TMA for igual a taxa de retorno esperado pelos investidores e o VPL maior que 0, o investimento é favorável. Sendo assim, o VPL cobrirá o investimento inicial, bem como a remuneração mínima exigida pelo investidor e gerando excedente financeiro (Lira, 2023).

A TIR é a taxa necessária para igualar o valor de um investimento (valor presente) com seus respectivos retornos de caixa gerado em cada período. A TIR maior que a TMA significa que o investimento é economicamente atrativo; se igual a TMA o investimento é indiferente; se menor que a TMA o investimento não é economicamente viável (Lira, 2023).

Estimado uma taxa de 12% de TMA podemos constatar que a o valor da VPL é menor que zero e que a TIR é menor que a TMA, tornando o projeto não viável economicamente, com a taxa de lucratividade de -1,26.

5. CONCLUSÃO

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi alcançado, tendo em vista que foi possível simular por meio do software DWSIM um projeto industrial de extração da cafeína dos grãos verdes de café a partir de estudos realizados em laboratório por Saldaña (1997), sobre pressão de 15 MPa e temperatura de 323 K obtendo valor de remoção de 73% na simulação, bem próximo ao obtido por Azevedo (2005), que constatou que são necessários aproximadamente 126,03g de CO₂ para remover 75% da cafeína presente em 1kg de café em 1 hora.

Com a remoção de aproximadamente 73% de cafeína, não podemos garantir o consumo deste produto por pessoas intolerantes a cafeína e/ou estão em busca de um estilo de vida mais saudável, mas se aumentarmos a vazão de alimentação para 0,162 Kg/s, podemos obter uma remoção de 97% de cafeína, garantindo que o produto esteja dentro dos limites de 0,1% de cafeína em 100g do produto pela Anvisa.

Com o investimento inicial de R\$ 2.415.104,34 e com os demais custos operacionais analisados na seção 4.5.2 deste trabalho mostrou que o projeto não é viável, porém o principal objeto foi analisar o processo de produção do café descafeinado, fazendo-se necessário uma análise econômica mais aprofunda com o auxílio de economistas para validar de forma mais fidedignas os dados em estudo.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para o desenvolvimento de novos trabalhos envolvendo o tema de descafeinação utilizando fluido supercrítico, são:

- Estudar os parâmetros associados as equações de estados envolvidas no processo de extração, com a adição de novos compostos presentes no café verde;
- Estudar os efeitos de diferentes temperaturas na solubilidade da cafeína no solvente;
- Montagem de uma planta piloto para a otimizar o processo de extração para estudar o aumentando o fluxo da corrente de CO₂;
- Estudar a possibilidade de aplicação deste método para outros produtos que contenham cafeína na sua composição.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. C.; CASAL, S.; OLIVEIRA, B. Benefícios do café na saúde: mito ou realidade? **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2169–2180, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000800031>. Acesso em: 3 mar 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Indicadores da Indústria de Café | 2022**. Disponível em: <https://estatisticas.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2022/#:~:text=Caf%C3%A9%20em%202022->. Acesso em: 5 jul. 2023.

AZEVEDO, A. B. A. DE. **Extração e recuperação dos princípios ativos do café utilizando fluidos supercríticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/334562>. Acesso em: 10 mar 2023.

BJELICA, B. et al. Effect of caffeine on the cardiovascular system and performance: a systematic review. **Turkish Journal of Kinesiology**, v. 9, n. 2, p. 125-132, 2023. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/pub/turkjin/issue/78670/1263307>. Acesso em: 17 mar 2023.

CRISTINA, E.; BRENELLI, S. A extração de cafeína em bebidas estimulantes: uma abordagem para um experimento clássico em química orgânica. **Quim. Nova**, v. 26, n. 1, p. 136–138, 2003. Disponível em: https://s3.sa-east-1.amazonaws.com/static.sites.s bq.org.br/quimicanova.s bq.org.br/pdf/Vol26No1_136_22.pdf. Acesso em: 3 mar 2023.

DE MARIA, C. A. B.; MOREIRA, R. F. A. Cafeína: revisão sobre métodos de análise. **Química Nova**, v. 30, n. 1, p. 99–105, fev. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000100021>. Acesso em: 08 abr 2023.

ESQUIVEL, P.; JIMÉNEZ, V. M. Functional properties of coffee and coffee by-products. **Food Research International**, v. 46, n. 2, p. 488–495, maio 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225066935_Functional_properties_of_coffee_and_coffee_by-products. Acesso em: 19 mai 2023.

FRANÇA, A. S. Coffee: decaffeination. **Encyclopedia of Food and Health**, p. 232-236, 2016. Disponível em: <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00183-5>. Acesso em: 23 jun 2023.

GLASS, R. M. Caffeine dependence: what are the implications. **JAMA**, v. 272, n. 13, p. 1065-1066, 1994. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8089891/>. Acesso em: 23 jun 2023.

GUERRA, R. O.; BERNARDO, G. C.; GUTIÉRREZ, C. V. Cafeína e esporte. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, v. 6, n. 2, p. 60–62, abr. 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbme/a/wgZRxVj37Tn5T3mMrGSmdfx/>. Acesso em: 21 abr 2023.

HALAL, S. L. M. E. **Composição, Processamento e Qualidade do Café**. Trabalho acadêmico (Bacharelado em Química de Alimentos) – Faculdade de Ciências Domésticas, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008. Disponível em: https://blog.ucoffee.com.br/ucoffee_blog/wp-content/uploads/2018/06/cafeina-e-quimica-do-cafe.pdf. Acesso em: 18 mar 2023.

JOBACK, K. G.; REID, R. C. Estimation of pure-component properties from group-contributions. **Chemical Engineering Communications**, v. 57, n. 1-6, p. 233–243, jul. 1987. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/00986448708960487>. Acesso em: 24 mar 2023.

LEAL, D. DOS S. **Avaliação de equações de estado no cálculo de propriedades do dióxido de carbono úteis ao estudo do seu escoamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/13120>. Acesso em: 24 mar 2023.

LIMA, A. R. **Descafeinação do café: compostos bioativos, efeito sobre o estresse oxidativo e perfil lipídico em ratos hiperlipidêmicos**. 2012. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/1172/2/TESE_%09Descafeina%C3%A7%C3%A3o%20do%20caf%C3%A9%3A%20compostos%20bioativos%2C%20efeito%20sobre%20o%20estresse%20oxidativo%20e%20perfil%20lip%C3%ADico%20em%20ratos%20hiperlipid%C3%AAmicos.pdf. Acesso em: 7 abr 2023.

LIRA, J. P. **Fórmula VPL no Excel: dicas práticas de como usar**. 2023. Disponível em: <https://www.hashtagtreinamentos.com/viabilidade-economica-no-excel>. Acesso em: 15 jun 2023.

MARANHÃO, L. F. **Avaliação do processo de adsorção de cafeína utilizando argila porosa heteroestruturada**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/62572>. Acesso em: 8 mar 2023.

MAZZAFERA, P. Maté drinking: caffeine and phenolic acid intake. **Food Chemistry**, v. 60, p. 67-71, 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814696003111?via%3Dihub>. Acesso em: 13 jun 2023.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Brasil é o maior produtor mundial e o segundo maior consumidor de café**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-e-o-maior-produtor-mundial-e-o-segundo-maior-consumidor-de-cafe#:~:text=O%20caf%C3%A9%20%C3%A9%20a%20segunda,164%2C9%20milh%C3%B5es%20de%20sacas>. Acesso em: 12 jul 2023.

MOHAMED, R. S. Extração e fracionamento de produtos de ocorrência natural com fluidos supercríticos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 17, n. 4, p. 344–353, dez. 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-20611997000400002>. Acesso em: 24 mar 2023.

MONTEIRO, M.C., TRUGO, L.C. Determinação de compostos bioativos em amostras comerciais de café torrado. **Química Nova**, v. 28, n. 4, p. 637-641, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000400016>. Acesso em: 15 abr 2023.

NAWROT, P. et al. Effects of caffeine on human health. **Food additives and contaminants**, v. 20, n. 1, p. 1–30, 2003. DOI 10.1080/0265203021000007840. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12519715/>. Acesso em: 23 jun 2023.

NEXTDAYCOFFEE. Caffè Roma Decaffeinated Coffee Beans (Bulk Buy 60kg). Disponível em: <https://www.nextdaycoffee.co.uk/caffe-roma-decaffeinated-coffee-beans-bulk-buy-44kg-514>. Acesso em: 19 jun 2023.

OLIVEIRA, E. et al. **Composição química do café submetido ao processo de descafeinação**. Disponível em: http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7254/121_39-CBPC-2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=A%20maioria%20dos%20m%C3%A9todos%20de. Acesso em: 24 mar 2023.

OLIVEIRA, R. M. E. **Consumo de café cafeinado e descafeinado por indivíduos adultos: parâmetros bioquímicos, fisiológicos, físicos e antropométricos**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Curso de Mestrado em Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009. Disponível em: http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/6798/Dissertacao_Roseane%20Maria%20Evangelista%20Oliveira.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 12 jul 2023.

PETERSEN, H. DE S. **Projeto de engenharia do processo de extração supercrítica de cafeína da erva mate**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: https://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/7472/2/DIS_HELENA_DE_SOUZA_PETERSEN_COMPLETO.pdf. Acesso em: 24 mar 2023.

REUTERS. **Pesquisa no País entra em fase decisiva**. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/agronegocio/pesquisa-no-pais-entra-em-fase-decisiva/#gref>. Acesso em: 6 jul. 2023.

SALDAÑA, M. D. A.; MAZZAFERA, P.; MOHAMED, R. S. Extração dos alcalóides: cafeína e trigonelina dos grãos de café com C supercrítico. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 17, n. 4, p. 371–376, dez. 1997. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/pp6pDtrhRyMf49YcHCb8G9F/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 24 mar 2023.

SANTOS, L. N. **Café e cafeína: uma abordagem contextualizada e interdisciplinar**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/6005/1/2013_LucasNunesSantos.pdf. Acesso em: 15 jun 2023.

SHLONSKY, A L.; KLATSKY, A. L.; ARMSTRONG, M. A. Traits of persons who drink decaffeinated coffee. **Annals of epidemiology**, v. 13, n. 4, p. 273–9, 2003. DOI 10.1016/s1047-2797(02)00414-3. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12684194/>. Acesso em: 18 jun 2023.

SILVA, T. et al. **Metodologias de extração de caféina a partir de vegetais e viabilidade técnica de descafeinação.** *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 38., 2017, Maringá. Disponível em: <https://repositorio.uniube.br/bitstream/123456789/508/1/METODOLOGIAS%20DE%20EXTRACAO%20DE%20CAFEINA.pdf>. Acesso em: 18 jun 2023.

ANEXO

Dimensionamento do trocador de calor

O primeiro passo é calcular a temperatura média do fluido frio:

$$t_{1m} = \frac{t_{1i}}{2} + \frac{t_1}{2} \quad (1)$$

Depois, calcular a temperatura de saída do fluido quente:

$$t_2 = \frac{1}{cp_2 * w_2} * [(cp_2 * t_{2i} * w_2) + (t_{1i} * w_1 * cp_1) - (t_1 * w_1 * cp_1)] \quad (2)$$

Após a determinação da temperatura de saída do fluido quente é calculado a temperatura média:

$$t_{2m} = \frac{t_{2i}}{2} + \frac{t_2}{2} \quad (3)$$

Com os dados iniciais para o fluido quente de acordo com sua temperatura média, calculam-se as cargas térmicas:

$$q_1 = w_1 * cp_1 * (-t_{1i} + t_1) \quad (4)$$

$$q_2 = w_2 * cp_2 * (-t_{2i} + t_2) \quad (5)$$

Em seguida, calcula-se a diferença de temperatura média:

$$\Delta t_{ml} = \frac{(\Delta t_1 - \Delta t_2)}{\log\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} \quad (6)$$

Para dar continuidade ao dimensionamento, feito a correção da temperatura pelo fator Farkheri mostrado a seguir:

$$P = \frac{t_1 - t_{1i}}{t_{2i} - t_{1i}} \quad (7)$$

$$R = \frac{t_{2i} - t_2}{t_1 - t_{1i}} \quad (8)$$

$$W = \frac{1 - R * P}{(1 - P)^{1/nps}} \quad (9)$$

$$S = \frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \quad (10)$$

$$Ft = \frac{S * \log(w)}{\log((S * W) - S + W + 1) * ((-S * W) + S + W + 1)} \quad (11)$$

O próximo passo inclui o cálculo de várias equações para chegar ao coeficiente de troca de calor:

Coeficiente de troca de calor interno

$$Si = \frac{pi * Nt * Di^2}{4 * Ntp} \quad (12)$$

$$Gi = \frac{w2}{Si} \quad (13)$$

$$vi = \frac{Gi}{\rho2} \quad (14)$$

$$Fi = \frac{w2}{\rho2} \quad (15)$$

$$Rei = \frac{Di * Gi}{\mu} \quad (16)$$

$$Ffh = \frac{0.41}{\log((0.23 * \frac{e^{10/9}}{Di}) + \frac{6.9}{Rei})^2} \quad (17)$$

$$K1 = (13.6 * Ffh) + 1 \quad (18)$$

$$K2 = 11.7 + \left(\frac{1.8}{pr2^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (19)$$

$$Nu = \frac{(pr2 * Rei * Ffh)}{((2 + K1) + ((\sqrt{2} * K2 * \sqrt{Ffh} * pr2^{2/3}) - 1))} \quad (20)$$

$$hi = \frac{k2 * Nu}{Di} \quad (21)$$

$$lfd = 1.359 * 0.0161 * Re_i^{0.25} \quad (22)$$

$$lfdt = lfd * pr2 \quad (23)$$

Coeficiente de troca de calor externo

$$De = \left(\frac{2}{pi * Do} * \frac{-pi * Do^2}{2} \right) + \sqrt{3} * pt^2 \quad (24)$$

$$So = \frac{B * C * Ds}{pt} \quad (24)$$

$$Go = \frac{w1}{So} \quad (25)$$

$$vo = \frac{Go}{\rho1} \quad (26)$$

$$Fo = \frac{w1}{\rho1} \quad (27)$$

$$Reo = \frac{De * Go}{\mu1} \quad (28)$$

$$Nu = 0.36 * 35^{0.33} * Reo^{0.55} \quad (29)$$

$$ho = \frac{k1 * Nu}{De} \quad (30)$$

$$Uc = \frac{1}{\left(\frac{Do}{2}\right) * k1 * \log\left(\frac{Do}{Di}\right) + \frac{1}{ho} + \frac{Do}{Di * hi}} \quad (31)$$

Agora calcula-se a área de troca térmica:

$$Ac = \frac{q2}{Ft * \Delta tml * Uc} \quad (32)$$

$$Alinear = pi * Nt * Do \quad (33)$$

$$L = \frac{Ad}{Alinear} \quad (34)$$

$$Nbs = \frac{L}{B} \quad (35)$$

$$Lt = B * Nbs \quad (36)$$

$$Nsc = Nsp * Nbs \quad (37)$$

$$Npt = \frac{6}{Nsp} \quad (38)$$

$$Ll = B * Nbs \quad (39)$$

$$A = Alinear * Ll \quad (40)$$

Também é possível calcular o coeficiente global de troca de calor:

$$U = \frac{q2}{A * Ft * \Delta tml} \quad (41)$$

Por fim, calcula-se queda de pressão

Pressão interna

$$\Delta pdis = \left(\frac{2 * Lt * Nsp * Ntp}{Di * \rho 2} \right) * Gi^2 * Ffh \quad (42)$$

$$\Delta ploc = \left(\frac{2 * Nsp}{\rho 2} \right) * Gi^2 * Ntp \quad (43)$$

$$\Delta pi = \Delta pdis + \Delta ploc \quad (44)$$

Pressão externa

$$fo = \frac{0.447}{Reo^{0.19}} \quad (45)$$

$$\Delta po = \frac{2 * Ds * Nbs * fo * Go^2}{De * \rho 1} \quad (46)$$