

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Julia da Silva de Alcantara Moreira



DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA
DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE
ÁGUA PELO PROCESSO DE ULTRAFILTRAÇÃO

RIO DE JANEIRO

2025

Julia da Silva de Alcantara Moreira

Desenvolvimento de Aplicativo para Dimensionamento de Sistemas de Tratamento de Água
pelo Processo de Ultrafiltração

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador(es): Cristiano Piacsek Borges
Yuri Gomes Leite e Silva

Rio de Janeiro

2025

CIP - Catalogação na Publicação

M838d Moreira, Julia da Silva de Alcantara
Desenvolvimento de Aplicativo para
Dimensionamento de Sistemas de Tratamento de Água
pelo Processo de Ultrafiltração / Julia da Silva de
Alcantara Moreira. -- Rio de Janeiro, 2025.
147 f.

Orientador: Cristiano Piacsek Borges.
Coorientador: Yuri Gomes Leite e Silva.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2025.

1. Membranas. 2. Ultrafiltração. 3.
Dimensionamento. 4. Excel/VBA. I. Borges,
Cristiano Piacsek, orient. II. Silva, Yuri Gomes
Leite e, coorient. III. Título.

Julia da Silva de Alcantara Moreira

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS
DE TRATAMENTO DE ÁGUA PELO PROCESSO DE ULTRAFILTRAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheiro
Químico.

Aprovado em 18 de julho de 2025.

Cristiano Piacsek Borges, D.Sc., UFRJ

Yuri Gomes Leite e Silva, M.Sc.

Andrea Valdman, D.Sc., UFRJ

Priscilla Lopes Florido, D.Sc.

Rio de Janeiro
2025

*Dedico este trabalho aos meus pais e à minha irmã
por sempre acreditarem em mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir sonhar e realizar, e por sempre me capacitar ao longo da caminhada.

À minha mãe, Magna, e ao meu pai, Leandro, agradeço por todo o cuidado, carinho e apoio. Foram eles que estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis, me dando suporte e força para que eu pudesse seguir em busca dos meus sonhos.

À minha irmã, Yasmin, agradeço por estudar comigo até de madrugada e por seus discursos motivadores, que tantas vezes me deram ânimo.

Às minhas avós, Rozilda e Marina, que não puderam ver o fim desta jornada, mas que me deram forças para continuar e sempre dar o meu melhor.

Sou grata também à minha família e aos amigos, que nunca me deixaram desistir e sempre demonstraram apoio em todas as fases dessa jornada.

Agradeço às minhas amigas da faculdade, Lorrany, Karen e Mari Maria, pela parceria, amizade e apoio incondicional ao longo da graduação.

Minha gratidão também à Família PAM, que acreditou no meu trabalho e me ofereceu suporte fundamental. Ao Nity e à Gabi, obrigada pelas conversas motivacionais.

Por fim, agradeço aos meus orientadores, Yuri e Cristiano, por toda a paciência, dedicação e entusiasmo com o projeto, contribuindo imensamente para a realização deste trabalho.

“Aqui no entanto nós não olhamos para trás por muito tempo, nós continuamos seguindo em frente, abrindo novas portas e fazendo coisas novas, porque somos curiosos...e a curiosidade continua nos conduzindo por novos caminhos. Siga em frente.”

Walt Disney

RESUMO

Moreira, Julia. **Desenvolvimento de Aplicativo para Dimensionamento de Sistemas de Tratamento de Água pelo Processo de Ultrafiltração**. Rio de Janeiro, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso Graduação em Engenharia Química - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

O crescente aumento populacional e a intensificação das atividades industriais têm imposto sérias restrições aos recursos hídricos, além de contribuir para a degradação da qualidade da água e o aumento dos custos de seu tratamento. Diante desse cenário, a tecnologia de separação por membranas, especialmente a ultrafiltração (UF), surge como uma alternativa promissora, devido à sua eficiência energética, operacional e qualidade do efluente tratado. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um aplicativo em Visual Basic for Applications (VBA) para o dimensionamento automatizado de sistemas de tratamento de água por UF. A ferramenta criada permite realizar cálculos técnicos, estimativas de investimento (CAPEX) e de custos operacionais (OPEX), com base nas características da corrente de alimentação e configuração da planta, determinando parâmetros como número de módulos, tempos de operação, consumo energético, uso de produtos químicos e materiais necessários para a construção da planta. Para isso, foram reunidas as principais equações que regem o processo de UF e construído um banco de dados com módulos de membranas disponíveis no mercado, bem como preços dos materiais. As informações foram integradas a um layout funcional e intuitivo, que organiza todas as macros desenvolvidas para facilitar o uso pelo projetista. O programa também gera automaticamente uma lista de materiais detalhada, contendo instrumentação, diâmetro de tubulações, válvulas e respectivos custos, servindo de base para as estimativas de investimento (CAPEX). Para verificar a aplicabilidade do sistema, foi realizada uma simulação de fornecimento de água tratada por UF para o campus da UFRJ na Cidade Universitária (Fundão). Os resultados indicaram que o custo operacional anual do sistema de UF representa apenas 3,45% do custo estimado para o processo convencional. Dessa forma, o programa desenvolvido apresenta-se como uma ferramenta eficaz para apoiar o dimensionamento técnico e econômico de sistemas de UF. O projeto foi desenvolvido em colaboração com a empresa PAM Membranas Seletivas, que contribuiu com suporte técnico e validação das funcionalidades.

Palavras-chave: Ultrafiltração. Dimensionamento. VBA.

ABSTRACT

Moreira, Julia. **Desenvolvimento de Aplicativo para Dimensionamento de Sistemas de Tratamento de Água pelo Processo de Ultrafiltração**. Rio de Janeiro, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso Graduação em Engenharia Química - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

The rapid population growth and the intensification of industrial activities have placed serious constraints on water resources, while also contributing to the degradation of water quality and the rising costs of water treatment. In this context, membrane separation technology, particularly ultrafiltration (UF), emerges as a promising alternative due to its energy efficiency, operational simplicity, and the quality of the treated effluent. This work aimed to develop an application using Visual Basic for Applications (VBA) for the automated design of water treatment systems based on UF. The tool enables technical calculations, investment estimates (CAPEX), and operational cost assessments (OPEX), based on the characteristics of the feed stream and system configuration. It determines key parameters such as the number of membrane modules, operating times, energy consumption, chemical usage, and materials required for plant construction. To support this, the main equations governing the UF process were compiled, and a database was created containing commercially available membrane modules as well as the prices of essential materials. These data were integrated into a functional and user-friendly interface that organizes all the developed macros to facilitate use by the system designer. The software also automatically generates a detailed bill of materials, including instrumentation, pipe diameters, valves, and their respective costs, forming the basis for CAPEX estimation. To evaluate the system's applicability, a simulation was conducted for supplying treated water via UF to the UFRJ campus located in Cidade Universitária (Fundão). The results showed that the annual operational cost of the UF system corresponds to only 3.45% of the estimated cost of the conventional process. Thus, the developed program proves to be an effective tool to support the technical and economic design of UF systems. The project was developed in collaboration with PAM Membranas Seletivas, which provided technical support and functionality validation.

Keywords: Ultrafiltration. Sizing. VBA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1. 1- Processo de separação por membranas.

Figura 3.1. 2-Forças motrizes em processos de separação por membranas densas e porosas.

Figura 3.2. 2-Módulo de fibra oca.

Figura 3.3.2. 1– Configurações de operação.

Figura 3.4.3. 1– Desempenho do fluxo do permeado conforme a variação da pressão através da membrana.

Figura 3.4.3. 2– Fluxo de água pura para diferentes PSM em função da pressão de operação do processo.

Figura 3.4.4. 1- Polarização de concentração.

Figura 3.4.4. 2– Incrustação superficial e interna em membranas porosas.

Figura 4.1. 1- Ilustração de um skid com dois trens.

Figura 4.1. 2-Fluxograma base do processo de UF.

Figura 4.1. 3- Fluxograma da unidade de limpeza da UF.

Figura 4.2. 1-Configurações dos botões com macros.

Figura 4.2. 2- Configurações dos botões com hiperlinks.

Figura 4.2. 3- Proteção de planilha.

Figura 4.3.7. 1-Fluxograma: Uma bomba de alimentação e um trem.

Figura 4.3.7. 2-Fluxograma: Uma bomba de alimentação e mais de um trem.

Figura 4.3.7. 3-Fluxograma: Número de bombas de alimentação e de trens maior que um.

Figura 4.4. 1-Banco de Membranas - Parte A e B.

Figura 4.4. 2- Banco de imagens - Parte A, B, C, D e E.

Figura 4.4. 3- Banco de dados de vazão e diâmetro para linhas de líquidos.

Figura 4.4. 4- Banco de dados de vazão e diâmetro para o soprador.

Figura 4.4. 5- Compressor modelo SCHULZ / BRAVO CSL 10.1/100.

Figura 4.4. 6-Banco de preços dos materiais – Parte A, B, C e D.

Figura 5.1. 1- Primeira Interface.

Figura 5.1. 2-Instruções do botão de “Ajuda” da primeira interface.

Figura 5.2. 1 - Segunda Interface.

Figura 5.2. 2- Segunda Interface: Seleção de Membranas.

Figura 5.2. 3- Segunda Interface: Código de membranas.

Figura 5.2. 4-Segunda Interface: Parâmetros.

Figura 5.2. 5-Segunda interface: Recomendações.

Figura 5.2. 6-Segunda Interface: Ajuda

Figura 5.3. 1- Terceira Interface.

Figura 5.3. 2-Terceira interface: Formulário de filtração.

Figura 5.3. 3-Terceira interface: Formulário da limpeza de manutenção.

Figura 5.3. 4-Terceira interface: Formulário da limpeza de recuperação.

Figura 5.3. 5-Terceira interface: Segunda etapa configurações dos tempos.

Figura 5.3. 6-Terceira interface: Código do volume gasto diariamente ou mensalmente.

Figura 5.3. 7-Terceira interface: Ajuda.

Figura 5.4. 1-Quarta interface.

Figura 5.4. 2-Quarta interface: Opcional PAC.

Figura 5.4. 3-Quarta interface: Formulário PAC.

Figura 5.4. 4-Quarta Interface: Consumo de químicos.

Figura 5.4. 5-Quarta Interface: Volumes de solução/trem, tempo de enchimento e vazão de alimentação.

Figura 5.4. 6-Quarta interface: Código para consumo de massa de químicos.

Figura 5.4. 7-Quarta interface: Ajuda.

Figura 5.5. 1- Quinta Interface.

Figura 5.5. 2-Código para calcular a quantidade de componente em operação.

Figura 5.5. 3-Quinta interface: Ajuda.

Figura 5.6. 1- Sexta Interface

Figura 5.6. 2- Código do custo de materiais.

Figura 5.6. 3-Sexta interface: Ajuda.

Figura 5.7. 1-Sétima Interface.

Figura 5.7. 2- Código para copiar parâmetros para a sétima interface.

Figura 5.7. 3- Lista de Materiais Detalhadas - Parte A.

Figura 5.7. 4- Lista de Materiais Detalhadas - Parte B.

Figura 5.7. 5- Banco de Materiais.

Figura 5.7. 6- Sétima interface: Ajuda.

Figura 5.8. 1- Relatório final.

Figura 5.9. 1-Simulação: Primeira interface.

Figura 5.9. 2- Simulação: Segunda interface - Parte A.

Figura 5.9. 3- Simulação: Segunda interface - Parte B.

Figura 5.9. 4- Simulação: Terceira interface.

Figura 5.9. 5- Simulação: Quarta interface.

Figura 5.9. 6- Simulação: Quinta interface.

Figura 5.9. 7-Simulação: Sexta interface-Custos químicos.

Figura 5.9. 8-Simulação: Sexta interface-Custos de energia elétrica.

Figura 5.9. 9-Simulação: Sexta interface-Custos de membranas e mão de obra.

Figura 5.9. 10-Simulação: Sexta interface-Custos operacionais totais e produção mensal.

Figura 5.9. 11-Simulação: Sexta interface-Custo de materiais.

Figura 5.9. 12-Simulação: Sexta interface-Relatório final.

Figura A. 1 - Bomba de alimentação modelo THEBE/THS-18.

Figura A. 2 - Soprador modelo ASTEN/CRC-4 610 36 TS.

Figura A. 3 - Bomba dosadoras modelo AWM 5000-MB 5000 / 59009.

Figura A. 4 - Bomba de limpeza e descarte modelo SCHNEIDER / BC-92 S 1C.

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. 1-Componentes e as respectivas tags do fluxograma de processo.

Tabela 4.1. 2-Identificação e componentes das linhas.

Tabela 4.1. 3-Componentes e as respectivas tags do fluxograma da unidade de limpeza.

Tabela 4.1. 4- Identificação e componentes das linhas de limpeza.

Tabela 4.2. 1- Botões do aplicativo.

Tabela 4.3.1. 1- Dados de entrada da primeira interface

Tabela 4.3.2. 1-Dados de entrada e saída da segunda interface.

Tabela 4.3.3. 1- Sugestões de tempos de filtração.

Tabela 4.3.3. 2 - Sugestões de tempos da limpeza de manutenção.

Tabela 4.3.3. 3-Sugestões de tempos da limpeza de recuperação.

Tabela 4.3.3. 4- Sugestões para a segunda etapa de configuração de tempos.

Tabela 4.3.4. 1-Parâmetros e sugestões para a etapa de consumos químicos.

Tabela 4.3.5. 1-Parâmetros e sugestões para a configuração dos principais componentes.

Tabela 4.3.5. 2-Vazões médias dos componentes.

Tabela 4.3.6. 1- Preços sugeridos para os custos operacionais.

Tabela 4.4. 1- Dados das membranas.

Tabela 4.5. 1- Dados de saída do relatório.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PSM - Processo de Separação por Membrana

Capex - Capital Expenditure

Opex - Operational Expenditure

VBA - Visual Basic Applications

UF - Ultrafiltração

MF- Microfiltração

NF- Nanofiltração

OI - Osmose Inversa

PAC - Poli(cloreto de alumínio)

NaOH - Hidróxido de Sódio (NaOH)

NaClO - Hipoclorito de Sódio

C₆H₈O₇ - Ácido Cítrico

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

PVDF - Poli(fluoreto de vinilideno)

LISTA DE SÍMBOLOS

r_A	Taxa de reação ($\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-3}$)
R	Constante dos gases ideais ($\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
γ	Constante de Euler-Mascheroni (-)
J	Fluxo de permeado ($\frac{L}{h.m^2}$)
L_P	Permeabilidade hidráulica ($\frac{L}{h.m.bar}$)
Δx	Espessura da membrana (m)
ΔP	Pressão transmembrana (bar)
K	Permeância hidráulica ($\frac{L}{m^2.h.bar}$)
Q_P	Vazão da corrente de permeado
A	Área de filtração da membrana
V_{pins}	Vazão de permeado instantânea
V_p	Vazão de permeado
$A_{requerida}$	Área requerida
$A/modulo$	Área por módulo
F_{OP}	Fluxo operacional
$N_{modulos}$	Número de módulos
$N_{modulo/trem}$	Número de módulos por trem
N_{trem}	Número de trens
$V/trem$	Vazão de permeado por trem
V_{morto}	Volume morto por módulo
D	Diâmetro do módulo
C	Comprimento do módulo
$V_{morto/trem}$	Volume morto por trem
$V_{morto total}$	Volume morto total
$F_{medio corrigido}$	Fluxo médio corrigido

$V_{ar/trem}$	Vazão de ar por trem
$V_{ar/modulo}$	Vazão de ar por módulo
$V_{ar\ total}$	Vazão de ar total
$N_{trem\ rec}$	Número de trens recomendados
$N_{max\ trem}$	Número máximo de trens
$N_{\frac{modulo}{trem}par}$	Número de módulos por trem, configuração par.
$N_{modulototalpar}$	Número de total de módulos, configuração par.
V_{ppar}	Vazão de permeado, configuração par.
P_{par}	Perda no fluxo operacional, configuração par.
F_{par}	Fluxo, configuração par
$N_{1tremip}$	Número de trens no primeiro conjunto, configuração ímpar.
$N_{modulototalimpar}$	Número total de módulos, configuração ímpar.
$N_{1modulotremip}$	Número de módulos por trem no primeiro conjunto, configuração ímpar.
$N_{2tremip}$	Número de trens no segundo conjunto, configuração ímpar.
$N_{2modulotremip}$	Número de módulos por trem no segundo conjunto, configuração ímpar.
V_{pimpar}	Vazão de permeado, configuração ímpar.
G_{impar}	Ganho no fluxo operacional, configuração ímpar.
F_{impar}	Fluxo, configuração ímpar.
$T_{Limpfis}$	Tempo da limpeza física.
$T_{totalfiltra}$	Tempo total da rotina de filtração.
T_{filtra}	Tempo de filtração.
Fr_{filtra}	Frequência diária de filtração.
D_{1m}	Duração da 1º limpeza de manutenção.
Fr_{1m}	Frequência da 1º limpeza de manutenção.
D_{2m}	Duração da 2º limpeza de manutenção.
Fr_{2m}	Frequência da 2º limpeza de manutenção.

D_{1r}	Duração da 1° limpeza de recuperação.
Fr_{1r}	Frequência da 1° limpeza de recuperação.
D_{2r}	Duração da 2° limpeza de recuperação.
Fr_{2r}	Frequência da 2° limpeza de recuperação.
D_I	Duração do teste de integridade.
Fr_I	Frequência do teste de integridade.
T_{filtra}	Tempo de filtração.
$T_{Limpfis}$	Tempo da limpeza física.
$D_{mesoudia}$	Duração mensal ou diária de cada etapa.
Fr_{etapa}	Frequência mensal ou diária de cada etapa.
D	Duração de cada etapa.
$V_{gtemdreno}$	Volume gasto por trem no dreno
$V_{gtremlimp}$	Volume gasto por trem nas limpezas
$V_{gtremdiames}$	Volume gasto por trem diariamente ou mensalmente em cada etapa
V_{gtem}	Volume gasto por trem em cada etapa
V_g	Volume gasto total em cada etapa
$V_{gtotaldiaoumes}$	Volume gasto total por dia ou mensalmente em cada etapa.
$V_{BD\ PAC}$	Vazão da bomba de dosagem PAC.
C_{Al}	Concentração de Al^{3+} .
V_A	Vazão de alimentação da planta.
D_{PAC}	Densidade da solução mãe de PAC.
C_{mPAC}	Concentração da solução mãe de PAC.
Co_{diaPAC}	Consumo da solução de PAC por dia.
Fr_{PAC}	Frequência de dosagem de PAC.
Co_{mesPAC}	Consumo da solução de PAC por mês.
$Co_{massamesPAC}$	Consumo de massa de PAC por mês.

$V_{solucao/trem}$ Volume de solução por trem.
 $V_{ali,limp}$ Vazão de alimentação da solução de limpeza.
 $t_{enchimento}$ Tempo de enchimento.
 $V_{BD,NaOCl}$ Vazão da bomba de dosagem do NaOCl.
 $C_{limp,NaOCl}$ Concentração da solução de limpeza do NaOCl.
 $C_{mae,NaOCl}$ Concentração da solução mãe do NaOCl.
 D_{NaOCl} Densidade do NaOCl.
 n_{OH} Número de mols de OH^- da solução de NaOH.
 pH_{NaOH} pH da solução de NaOH.
 $C_{limp,NaOH}$ Concentração da solução de limpeza do NaOH.
 $V_{BD,NaOH}$ Vazão da bomba de dosagem do NaOH.
 $C_{mae,NaOH}$ Concentração da solução mãe do NaOH.
 D_{NaOH} Densidade do NaOH.
 $V_{BD,Ac}$ Vazão da bomba de dosagem do Ácido.
 $C_{limp,Ac}$ Concentração da solução de limpeza do Ácido.
 $C_{mae,Ac}$ Concentração da solução mãe do Ácido.
 $Co_{limpeza/trem}$ Consumo da solução de limpeza por trem.
 V_{BD} Vazão da bomba de dosagem.
 $Co_{limpeza/dia}$ Consumo da solução de limpeza por dia.
 $Fr_{limpeza}$ Frequência de limpeza.
 $Co_{limpeza/mes}$ Consumo da solução de limpeza por mês.
 $Co_{massalimpeza/mes}$ Consumo de massa de químicos por mês.
 $D_{limpeza}$ Densidade da solução de limpeza.
 $Co_{massaAc/mes}$ Consumo de massa de ácido por mês.
 $Co_{Ac/mes}$ Consumo da solução de ácido por mês.
 $V_{1gmanutencao}$ Volume gasto na 1ª limpeza de manutenção.

$Fr_{1manutencao}$ Frequência da 1ª limpeza de manutenção.

$V_{componente}$ Vazão por componente.

V_{media} Vazão média do componente.

Qtd_{op} Quantidade do componente em operação.

P Potência consumida do componente.

P_{media} Pressão média do componente.

ef Eficiência do componente.

$T_{alimentacao}$ Tempo de operação diário da bomba de alimentação.

T_{flush1} Tempo do primeiro flush.

T_{flush2} Tempo do segundo flush.

Fr_{1manut} Frequência da primeira limpeza de manutenção.

Fr_{2manut} Frequência da segunda limpeza de manutenção.

$T_{soprador}$ Tempo de operação diário do soprador.

T_{borb} Tempo de borbulhamento da etapa de filtração.

Fr_{fisica} Frequência da limpeza física.

T_{1borb} Tempo primeiro borbulhamento.

T_{2borb} Tempo segundo borbulhamento.

T_{1dreno} Tempo primeiro dreno.

T_{2dreno} Tempo segundo dreno.

Fr_{2rec} Frequência da segunda limpeza de recuperação.

$T_{limpeza}$ Tempo de operação diário da bomba de limpeza.

Fr_{1rec} Frequência da primeira limpeza de recuperação.

$T_{descarte}$ Tempo de operação diário da bomba de descarte.

$V_{mediadescarte}$ Vazão média da bomba de descarte.

$Co_{mensaleletrica}$ Consumo mensal de energia elétrica dos componentes.

T_{diario} Tempo diário de operação dos componentes.

$Cu_{mensaleletrica}$ Custo mensal de energia elétrica dos componentes.

$Tarifa$ Tarifa de energia elétrica.

$Co_{mensalmembrana}$ Consumo mensal de membranas.

$Vi_{membrana}$ Vida útil da membrana.

$Cu_{mensalmembrana}$ Custo mensal de membranas.

$Cu_{unimembrana}$ Custo unitário da membrana.

$V_{mensalproduzido}$ Volume mensal produzido.

Cu_{volume} Custo por volume sem amortização.

Cu_{total} Custo operacional total.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
2 OBJETIVO	25
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1.MEMBRANAS	26
3.2.MEMBRANAS NA FORMA DE FIBRA OCA.....	29
3.3.ULTRAFILTAÇÃO (UF)	30
3.3.1.DIAFILTRAÇÃO.....	31
3.3.2.PARÂMETROS E CONFIGURAÇÕES DE OPERAÇÃO	31
3.3.3.ULTRAFILTRAÇÃO APLICADA NO TRATAMENTO DE ÁGUA.....	33
3.4.ASPECTOS QUE AFETAM E AVALIAM O DESEMPENHO DA MEMBRANA	35
3.4.1.FLUXO DE PERMEADO E PERMEÂNCIA	36
3.4.2.RETENÇÃO.....	37
3.4.3.INFLUÊNCIA DO DIFERENCIAL DE PRESSÃO NA EFICIÊNCIA DA MEMBRANA.....	38
3.4.4.POLARIZAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO E INCRUSTAÇÃO.....	39
3.5.LIMPEZA DAS MEMBRANAS	42
3.6.PROGRAMAS DE DIMENSIONAMENTO DE PROCESSOS DE UF	42
4 METODOLOGIA.....	44
4.1 PROCESSO E ROTINAS DE ULTRAFILTAÇÃO.....	44
4.2 FUNCIONAMENTO BÁSICO E PADRONIZAÇÃO DO PROGRAMA	51
4.3 ETAPAS DO PROGRAMA.....	54
4.3.1. INÍCIO: CARACTERÍSTICAS DO PROJETO	55
4.3.2 SELEÇÃO DE MEMBRANAS	56
4.3.3 CONFIGURAÇÕES DOS TEMPOS.....	64
4.3.4 CONSUMOS DE PRODUTOS QUÍMICOS.....	69
4.3.5 DIMENSIONAMENTO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES:	75
4.3.6 CUSTO DE OPERAÇÃO	78
4.3.7 CUSTO DE MATERIAIS E LISTAS DE MATERIAIS DETALHADAS.....	83
4.4 BANCO DE DADOS	90
4.5.RELATÓRIO	101
4.6.SIMULAÇÃO	103
5 RESULTADOS	103

5.1.INÍCIO: CARACTERÍSTICAS DO PROJETO	103
5.2.SELEÇÃO DE MEMBRANAS	104
5.3.CONFIGURAÇÕES DE TEMPOS	109
5.4.CONSUMO DE PRODUTOS QUÍMICOS	114
5.5.DIMENSIONAMENTO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES	118
5.6.CUSTO DE OPERAÇÃO	120
5.7.CUSTO DE MATERIAIS E LISTA DE MATERIAIS DETALHADAS	121
5.8.RELATÓRIO	126
5.9.SIMULAÇÃO: ÁGUA PARA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.	127
6 CONCLUSÕES	140
7 REFERÊNCIAS	142

1 INTRODUÇÃO

No presente século, há uma preocupação com a escassez da água e do impacto provocado pelo aquecimento global nesta problemática. O aumento da população global, a limitação de recursos naturais, além do aumento das atividades industriais contribuem para diminuição da água de boa qualidade. A água sofre com diversas fontes de poluição, elevando seus custos para o tratamento. Portanto, a gestão e o tratamento da água tornam-se um desafio significativo para diversos setores da indústria e das cidades em crescimento (ANANTONY,2011).

A água um dos mais importantes solventes disponíveis, por dissolver diversos elementos e compostos por onde ela percorre, facilmente contamina-se por substâncias tóxicas, tais como: despejos fármacos, inseticidas, produtos químicos e petroquímicos, esgotos domésticos, efluentes industriais e fertilizantes, tornando-a imprópria para sua utilização e de difícil remoção de muitos desses contaminantes pelo sistema sanitário convencional. Somados às contaminações, há o desperdício e o uso irracional da água nas atividades agrícolas, domésticas e industriais contribuindo para um maior consumo (SANTOS,2020).

Na área de saneamento ambiental, a crescente preocupação com a remoção de patógenos e a presença de micropoluentes em mananciais poluídos coloca em foco a necessidade urgente de medidas robustas de descontaminação e preservação da qualidade da água (PEIG,2011).

Diante deste cenário, o processo de separação por membranas (PSM) surge como uma alternativa promissora para o tratamento de água. Os PSM têm sido amplamente utilizado em diversos setores da indústria, como nas áreas médica, biotecnológica, alimentícia, farmacêutica e, especialmente, no tratamento de águas. Neste último, as membranas são aplicadas em processos como a dessalinização, remoção de compostos orgânicos, tratamento de esgotos, desmineralização de água para uso em caldeiras, entre outros (HABERT,2006).

A separação por membranas é considerada um processo com baixa demanda de energia e pouco uso de produtos químicos, apresentando diversas vantagens de interesse para indústria. Dentre elas a seletividade, que em determinadas aplicações, torna os PSM como a única alternativa de separação. Este processo também se destaca pela simplicidade de operação e escalonamento, os sistemas são modulares e as informações para o dimensionamento de uma planta, podem ser adquiridas em equipamentos pilotos,

operando com módulos de membrana de mesma dimensão e características daqueles utilizados industrialmente. Além disso, a operação dos equipamentos com membranas é simples e não demanda muita mão de obra (HABERT et al.,2006).

Dentre os processos de separação por membranas aplicados no tratamento de água, a ultrafiltração (UF) recebe destaque. A tecnologia de ultrafiltração, que emprega o princípio da barreira física, retendo poluentes ligeiramente acima da porosidade das membranas, e destaca-se como uma alternativa aos métodos tradicionais de tratamento de água e esgoto. Isso se deve à garantia no tratamento, à instalação verticalizada (que economiza espaço) e à facilidade de automação, bem como à redução ou ausência de produtos químicos, com exceção da limpeza química. Além disso, a ultrafiltração simplifica o processo de tratamento em comparação com outras tecnologias, as quais demandam um número maior de operações unitárias para alcançar remoções semelhantes (ALMEIDA,2023).

Apesar das inúmeras vantagens relacionadas à aplicação de membranas, a literatura destaca como desafio a redução dos custos envolvidos, representado por Capital Expenditure (Capex) e o Operational Expenditure (Opex). O Capex refere-se aos custos de investimento inicial do processo, enquanto o Opex está relacionado às despesas operacionais contínuas (KEHREIN,2021). Esses custos reforçam a importância de um dimensionamento preciso da planta, etapa fundamental para garantir que a capacidade de produção atenda à demanda esperada, otimizando o uso de recursos, reduzindo os gastos com energia e produtos químicos, e assegurando a segurança operacional. Além disso, otimizar essa etapa, possibilita uma entrega eficaz e competitiva dos serviços, e redução do tempo homem-hora.

Nesse cenário, a utilização do VBA (Visual Basic for Applications) em conjunto com o Microsoft Excel apresenta-se como uma alternativa eficiente para aprimorar processos de dimensionamento. Trata-se de uma solução acessível, de fácil uso, versátil e capaz de executar tarefas complexas. Por meio da automação das planilhas, é possível agregar funcionalidades extras e melhorar a interface gráfica, tudo isso por meio de algoritmos desenvolvidos em VBA (Silva,2019).

A empresa Pam Membranas Seletivas é uma referência no setor de membranas na indústria brasileira, sendo pioneira na fabricação desse tipo de tecnologia na América Latina. Além da produção, a empresa também atua no desenvolvimento de projetos personalizados, adaptados às necessidades de cada cliente. Neste trabalho, a Pam colaborou como parceira, oferecendo consultoria especializada e fornecendo dados para a realização da pesquisa.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um aplicativo em planilha Excel para o dimensionamento de sistemas de tratamento de água superficial por meio do processo de ultrafiltração, utilizando o Excel/VBA como ferramenta.

Os objetivos específicos envolvidos no desenvolvimento desse aplicativo são listados a seguir:

1. Modelar tecnicamente o sistema de ultrafiltração com base em equações e dados de membranas.
2. Mapear membranas comerciais de ultrafiltração, com o intuito de compor um banco de dados.
3. Automatizar cálculos via VBA para agilizar o dimensionamento.
4. Avaliar viabilidade econômica por meio de custos de investimento e operacionais.
5. Fornecer resultados organizados em um relatório final para auxiliar no projeto e implantação do sistema.
6. Realizar um estudo de caso com o software desenvolvido em um sistema de tratamento de água para o fornecimento da Universidade Federal, campus Fundão.

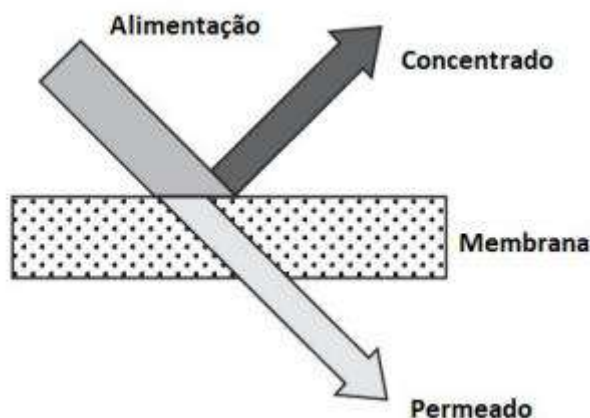
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MEMBRANAS

Na década de 1960, foi introduzido um novo método de separação baseado no uso de membranas sintéticas, o qual se mostrou uma alternativa promissora aos processos convencionais, apresentando desempenho comparável ou até superior ao das membranas naturais. Essa tecnologia, conhecida como processo de separação por membranas (PSM), passou a ganhar relevância devido ao seu menor consumo energético e à ausência de reagentes químicos no processo. Além disso, destaca-se por sua simplicidade operacional, tornando-se uma solução tecnicamente acessível e segura. Tais vantagens contribuíram para sua crescente adoção na indústria, consolidando o PSM como uma estratégia sustentável do ponto de vista ambiental (FERREIRA,2021).

As membranas atuam na separação de componentes de uma mistura, que podem estar presentes em uma única fase ou em fases distintas. Atuando como uma barreira seletiva, a membrana, que pode ser permeável ou semipermeável, controla o transporte de determinadas espécies, resultando em duas correntes: uma enriquecida (concentrado) e outra empobrecida em certos componentes (permeado), conforme esquematizado na Figura 3.1. 1. De acordo com o material de fabricação, as membranas podem ser classificadas como poliméricas, inorgânicas ou metálicas (SCOTT,1995).

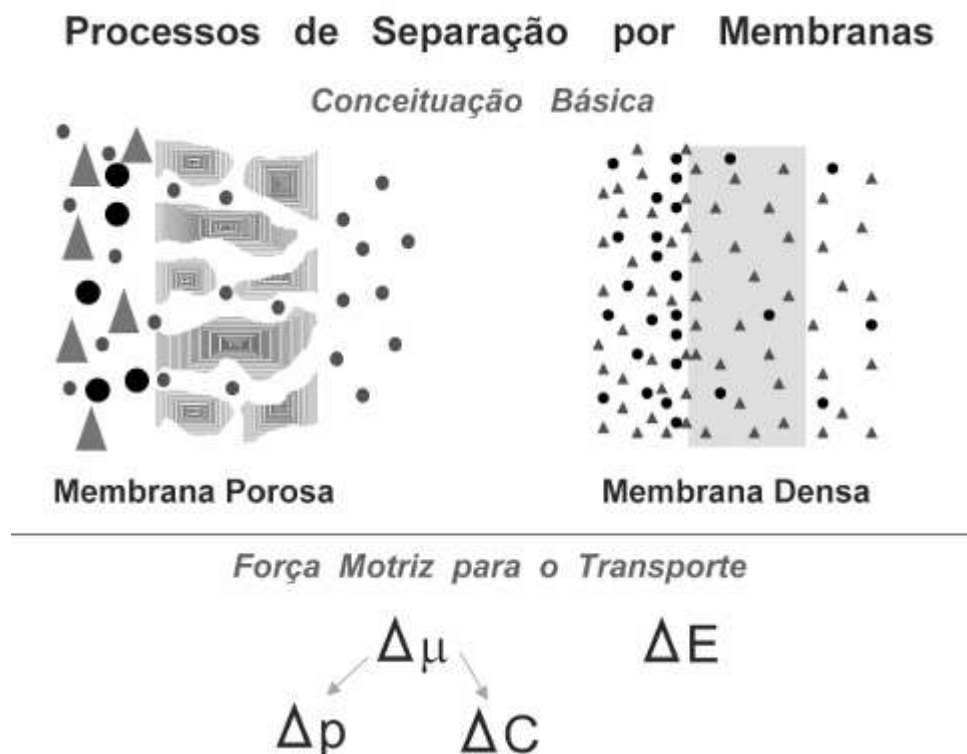
Figura 3.1. 1- Processo de separação por membranas.



Fonte: ORNELAS,2021.

As membranas podem apresentar distintas configurações estruturais, diretamente relacionadas às finalidades específicas de separação a que se destinam. De modo geral, elas são agrupadas em dois tipos principais: porosas e densas (Figura 3.1. 2). A escolha entre esses tipos depende, sobretudo, das propriedades da superfície em contato com a mistura a ser tratada. Além disso, essas estruturas podem ser isotrópicas, com características uniformes ao longo de toda a espessura, ou anisotrópicas, que apresentam variações morfológicas em diferentes camadas. No caso das anisotrópicas, é comum a presença de uma camada superficial extremamente fina, conhecida como “pele”, com espessura em torno de 1 μm , que exerce o papel de barreira seletiva, apoiada por uma base porosa que garante resistência mecânica. Quando ambas as camadas são produzidas a partir do mesmo polímero, a membrana é denominada anisotrópica integral. Já quando são utilizados materiais distintos para cada camada, trata-se de uma membrana anisotrópica composta (HABERT et al.,2006).

Figura 3.1. 2-Forças motrizes em processos de separação por membranas densas e porosas.



Fonte: HABERT et al.,2006.

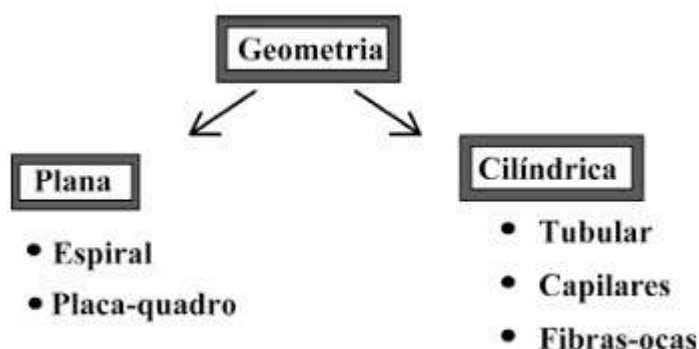
Para que uma determinada substância seja transportada por meio de uma membrana, é imprescindível a presença de uma força motriz que impulse esse deslocamento. Nos sistemas de separação por membranas utilizados industrialmente, essa força é geralmente representada por um gradiente de potencial químico e/ou elétrico (Figura 3.1. 2). Considerando que esses processos ocorrem predominantemente em condições atômicas, o gradiente de potencial químico pode ser descrito com base apenas nas diferenças de pressão e concentração, ou no caso de gases, de pressão parcial, entre os lados da membrana. A forma como ocorre o transporte das espécies depende tanto da estrutura morfológica da membrana quanto do tipo de força motriz aplicada. Assim, o movimento pode acontecer por mecanismos convectivos ou difusivos. Além disso, a morfologia da membrana influencia diretamente o seu desempenho seletivo, definindo os fundamentos físico-químicos que determinam quais componentes serão preferencialmente permeáveis (HABERT et al.,2006).

As tecnologias de separação por membranas têm sido amplamente empregadas em diversos segmentos industriais, devido à sua versatilidade na purificação e fracionamento de diferentes tipos de misturas. Esses processos envolvem sistemas contendo gases e vapores, líquidos miscíveis, como soluções aquosas e orgânicas, bem como misturas sólido-líquido, dispersões líquido-líquido e soluções contendo solutos dissolvidos. A aplicação de membranas nesses contextos varia conforme o tipo de separação desejada. Dentre as principais utilizações industriais para a purificação de água, destaca-se a microfiltração, voltada à remoção de partículas finas, incluindo aquelas em escala submicrométrica, presentes em líquidos e gases. Já a ultrafiltração é empregada na retenção de macromoléculas e colóides, enquanto a nanofiltração possibilita a retenção de molécula de menor massa molar e íons de maior valência. Por fim, a osmose inversa representa uma abordagem eficiente para a remoção quase completa de substâncias dissolvidas e suspensas, sendo amplamente utilizada em processos de dessalinização e purificação de água (SCOTT,1995).

3.2. MEMBRANAS NA FORMA DE FIBRA OCA

As membranas podem ser desenvolvidas em diferentes formatos estruturais, como em tubos, folhas planas ou fibras ocas, conforme as exigências do tipo de separação envolvido (Figura 3.2. 1). A escolha do formato ideal leva em conta principalmente as condições operacionais do processo e as propriedades da substância a ser separada. Dentre as configurações existentes, as membranas constituídas por fibras ocas têm se destacado significativamente nos últimos anos, devido aos benefícios funcionais proporcionados por essa configuração (HABERT et al.,2006).

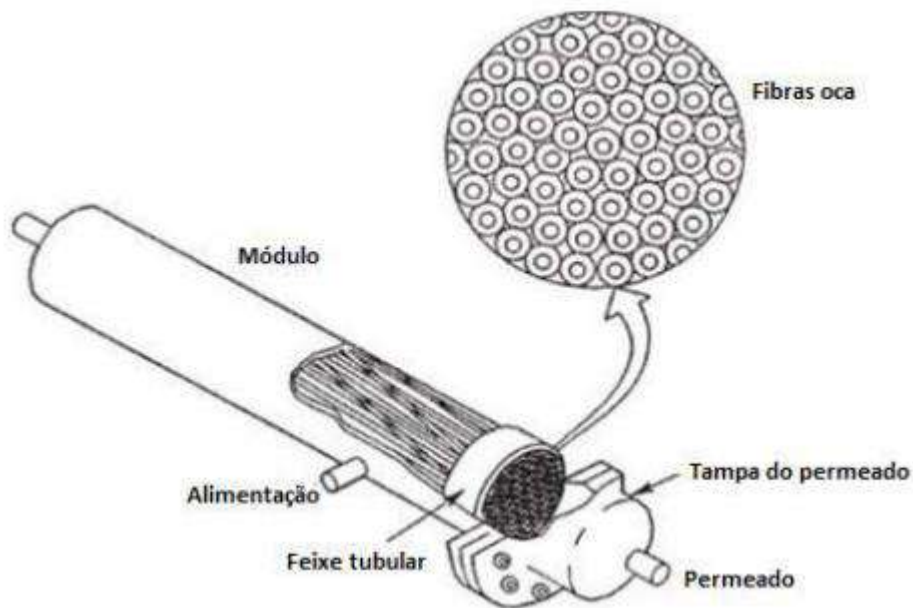
Figura 3.2. 1-Configurações das membranas.



Fonte: HABERT et al.,2006.

As membranas na forma de fibra oca e os módulos correspondentes foram descritos pela primeira vez na literatura científica em 1966, por meio das patentes registradas por Mahon (1966). Esses módulos apresentam formato cilíndrico e são preenchidos internamente por feixes de membranas cujas extremidades são seladas (Figura 3.2. 2). Conforme mencionado anteriormente, a configuração de fibra oca tem ganhado destaque devido a uma série de vantagens técnicas. Entre os principais benefícios, destacam-se: (i) alta razão entre área de membrana e volume do módulo, o que resulta em elevada densidade de empacotamento, promovendo maior produtividade e excelente eficiência energética; (ii) robustez mecânica, que permite sua aplicação em processos com altos fluxos e viabiliza a retrolavagem para limpeza dos poros; e (iii) flexibilidade e facilidade de manuseio (ORNELAS,2021).

Figura 3.2. 2-Módulo de fibra oca.



Fonte: ORNELAS,2021.

Os módulos de membranas podem ser agrupados em estruturas chamadas trens de filtração, compostos por unidades conectadas em série ou em paralelo. Essa configuração visa aprimorar a eficiência na remoção de contaminantes e recuperação de água da corrente de alimentação, sendo amplamente aplicada em processos como o tratamento de água e efluentes (METCALF et al., 2014).

3.3. ULTRAFILTAÇÃO (UF)

A ultrafiltração é uma técnica de separação utilizada para fracionar e purificar soluções que contêm macromoléculas com massas molares variando entre 10^3 e 10^6 Dalton. O mecanismo de separação baseia-se na exclusão por tamanho, em que os poros da membrana atuam como barreiras físicas, retendo solutos com base em sua dimensão molecular. As membranas de ultrafiltração possuem poros com diâmetro na faixa de 0,01 a 0,05 μm , o que permite a retenção seletiva de compostos com diferentes massas molares (FILHO, 2016).

Essa tecnologia é amplamente empregada no tratamento de água, devido a uma série de vantagens operacionais e funcionais. Entre os principais benefícios, destacam-se: remoção eficiente de sólidos suspensos, coloides, turbidez, algas, parasitas e vírus; configuração compacta dos sistemas, o que reduz o espaço físico necessário em comparação a métodos convencionais; operação e manutenção simplificadas; menor

demanda por produtos químicos; e capacidade de permitir a passagem de sais essenciais, contribuindo para a produção de água potável com qualidade elevada (FILHO, 2016).

3.3.1. DIAFILTRAÇÃO

O processo de diafiltração é uma forma de operação dos PSM empregado principalmente em microfiltração e ultrafiltração, sendo caracterizado por uma alimentação contínua de solvente, com vazão igual ao do permeado. A técnica é frequentemente referida como uma “lavagem” da solução problema (HABERT et al.,2006). A diafiltração é utilizada quando se deseja purificar um soluto presente em uma solução que contém contaminantes com dimensões inferiores às do soluto de interesse. Nesse caso, os contaminantes conseguem atravessar a membrana (permeiam), enquanto o soluto desejado é retido, aumentando a pureza do mesmo à medida que operação ocorre. Quando a pureza desejada é atingida, a alimentação de solvente pode ser interrompida. O objetivo também pode ser elevar a recuperação dos componentes que saem no permeado. Além do modo contínuo, a diafiltração também pode ser operada em regime semicontínuo, no qual o solvente é adicionado em etapas, conforme a necessidade do processo. Essa flexibilidade operacional permite adequar o sistema às diferentes exigências de separação e purificação (HABERT et al.,2006).

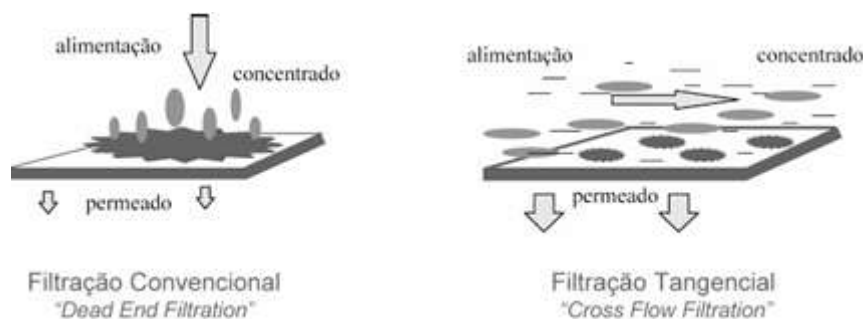
3.3.2. PARÂMETROS E CONFIGURAÇÕES DE OPERAÇÃO

Ao projetar um sistema de ultrafiltração (UF), é fundamental compreender seus modos de operação, sendo dois conceitos especialmente relevantes: operação a pressão constante e operação a fluxo constante. Na operação a pressão constante, estabelece-se um valor fixo para a pressão de alimentação (set point), que é mantido ao longo de todo o processo, independentemente das variações de fluxo do permeado. Nesse regime, admite-se que o fluxo tenderá a diminuir com o tempo, em função da formação de uma camada depositada sobre a superfície da membrana (torta), decorrente da polarização por concentração, bem como do progressivo entupimento dos poros da membrana (ORNELAS,2021).

Já na operação a fluxo constante, busca-se manter o fluxo de permeado estável durante todo o processo. Para que isso seja possível, é necessário um aumento gradual da pressão de alimentação, a fim de compensar as perdas de desempenho causadas pelos mesmos fatores citados anteriormente: deposição de sólidos na superfície da membrana e obstrução de seus poros (ORNELAS,2021).

Há duas configurações de operação, filtração frontal (dead-end) e filtração tangencial (cross-flow), Figura 3.3.2. 1. Quando uma solução ou suspensão é submetida à filtração frontal, o fluxo de alimentação incide perpendicularmente sobre a superfície da membrana. Nesse tipo de operação, a solução atravessa os poros da membrana (gerando o permeado), enquanto os solutos ou partículas em suspensão são retidos. Essa retenção promove o acúmulo progressivo de material sobre a superfície da membrana, formando uma camada concentrada ou até mesmo uma torta de filtração, que aumenta a resistência à passagem do fluido. Trata-se de um processo não estacionário, pois a concentração de solutos junto à membrana tende a crescer com o tempo, impactando negativamente o desempenho do sistema. Apesar de suas limitações, a configuração dead-end apresenta diversas vantagens, especialmente em processos com baixo volume ou soluções diluídas. Como todo o fluido alimentado atravessa a membrana sem recirculação, o sistema torna-se mais simples e compacto, com menor complexidade operacional. Além disso, essa abordagem permite uma alta taxa de recuperação da alimentação, uma vez que há pouca ou nenhuma geração de concentrado. (HABERT et al.,2006).

Figura 3.3.2. 1– Configurações de operação.



Fonte: HABERT et al.,2006.

Por outro lado, na filtração tangencial, a corrente de alimentação escoar de maneira paralela à superfície da membrana, enquanto o permeado é extraído transversalmente a esse fluxo. Esse arranjo hidrodinâmico favorece o arraste de partículas ao longo da membrana, reduzindo a deposição de sólidos e permitindo uma operação mais estável. Embora ainda ocorra concentração de solutos próximo à interface da membrana, esse efeito é atenuado pela ação do escoamento tangencial, que contribui para a dispersão contínua do material retido. Assim, torna-se possível operar em regime próximo ao estacionário, com fluxos de permeado relativamente constantes, ainda que inferiores aos

obtidos com solvente puro, devido à resistência adicional imposta pela camada de soluto acumulado (HABERT et al.,2006).

As membranas de UF na forma de fibras ocas podem operar de duas formas distintas, definidas pela direção do escoamento do fluido em relação à superfície ativa da membrana: fluxo de dentro para fora (*inside-out*) ou de fora para dentro (*outside-in*). No primeiro caso, a região responsável pela separação seletiva está localizada na parte interna das fibras, de modo que a solução de alimentação é conduzida para o interior da fibra, atravessa a parede da membrana e o permeado é coletado na parte externa. Já na configuração *outside-in*, a camada seletiva encontra-se na face externa da fibra, e a alimentação percorre a parte de fora, penetrando a parede da membrana em direção ao seu interior, onde o permeado é coletado. Essa distinção entre os modos está diretamente relacionada ao tipo de aplicação e à natureza do fluido a ser tratado, influenciando fatores como suscetibilidade ao entupimento e estratégias de limpeza (XU et al., 2008).

3.3.3. ULTRAFILTRAÇÃO APLICADA NO TRATAMENTO DE ÁGUA

As águas superficiais são aquelas que se acumulam ou escoam sobre a superfície terrestre, formando corpos hídricos como rios, lagos, riachos, lagoas e pântanos. Essas águas resultam principalmente das precipitações que não se infiltram no solo, sendo fundamentais para o abastecimento humano, a agricultura, a geração de energia e a manutenção dos ecossistemas aquáticos. Devido à sua exposição direta ao ambiente, são mais suscetíveis à contaminação por poluentes urbanos, industriais e agrícolas, o que torna essencial o monitoramento e a gestão adequados para garantir sua qualidade e disponibilidade (NAIME,2011).

Hofman e colaboradores (1998), avaliaram a aplicação de quatro alternativas de tratamento com ultrafiltração (UF) para ampliar a capacidade de uma das estações de produção de água potável da Amsterdam Water Supply. A UF foi investigada como estratégia para aprimorar a qualidade microbiológica da água, além de remover fosfato, partículas em suspensão e materiais coloidais. Os testes revelaram que é possível manter uma operação estável das membranas, alcançando alta eficiência. O processo reduziu os níveis de fosfato de cerca de 60 µg/L para 20 µg/L, eliminou quase completamente ferro e turbidez, e demonstrou eficiência logarítmica entre 2,5 e 3,5 na remoção de microrganismos. Esses dados reforçam o potencial da UF como solução eficaz e

promissora para ampliar a produção de água potável, inclusive em unidades descentralizadas e de menor escala.

Chew et al (2016), compararam as vantagens e desvantagens entre sistemas convencionais e os baseados em UF. A pesquisa levou em conta cinco critérios principais: investimentos iniciais, custos operacionais, manutenção, eficiência na qualidade da água produzida e volume de perdas. Para tal análise, foi realizado um estudo de caso realizado em uma estação na Malásia que comparou ambos os métodos, utilizando como fonte de abastecimento um rio. Os resultados demonstraram que o sistema UF oferece estabilidade na qualidade da água tratada, mesmo com variações na água bruta. Além disso, o lodo gerado no processo de retrolavagem da UF apresenta composição semelhante à da água de entrada, com exceção da maior concentração de sólidos. Em contraste, o lodo oriundo do sistema convencional apresentou elevada carga de resíduos de alumínio, provenientes do coagulante utilizado no tratamento.

Wu et al (2022) propuseram uma técnica para aprimorar o desempenho de membranas de ultrafiltração (UF), utilizando a combinação de óxido de grafeno com a aplicação de carbonato de prata sobre a superfície da membrana. O material principal empregado foi o poli(fluoreto de vinilideno) - PVDF, e o objetivo foi transformar suas características estruturais e funcionais. Como resultado da modificação, a membrana tornou-se mais hidrofílica e passou a apresentar poros mais abertos, o que se traduziu em menor resistência ao acúmulo de impurezas e maior capacidade de vazão. Um dos modelos produzidos apresentou um fluxo permeado de água pura mais que duas vezes superior à de uma membrana convencional, elevando consideravelmente a eficiência do processo. Além disso, testes demonstraram que essa versão modificada apresentou melhor recuperação do fluxo após o uso, menor redução da vazão ao longo do tempo e maior ação contra microrganismos. Em experimentos sucessivos com água de lagoa, essa membrana manteve o melhor desempenho, tanto na quantidade de água filtrada quanto na qualidade final obtida, indicando que a técnica de modificação proposta é extremamente eficaz para melhorar as propriedades operacionais das membranas de UF em aplicações reais.

Oliveira (2010) avaliou o desempenho do processo de ultrafiltração na Estação de Tratamento de Água do Alto da Boa Vista, responsável por tratar a água do Reservatório Guarapiranga, localizado na Região Metropolitana de São Paulo. O sistema permaneceu em operação por mais de 2.900 horas, apresentando bom desempenho hidráulico, com alta taxa de recuperação e pressão de operação estável. Os testes demonstraram elevada

eficiência na remoção de diversos contaminantes, incluindo redução significativa de carbono orgânico total, cor aparente, turbidez e condutividade elétrica, além de eliminação total de coliformes em uma das amostras analisadas. O processo também se mostrou eficaz na retirada de bactérias heterotróficas, fluoretos, nitratos e alumínio. Quando comparada à água tratada pelo método convencional utilizado na mesma estação, a água obtida por ultrafiltração apresentou qualidade superior, destacando-se especialmente pela menor turbidez.

Oliveira (2019) investigou a eficácia do tratamento de água por meio do processo de ultrafiltração, com foco na conformidade com os critérios de potabilidade estabelecidos na legislação brasileira. A pesquisa partiu da constatação de que os recursos hídricos vêm sendo cada vez mais impactados por atividades humanas, principalmente pela crescente presença de resíduos domésticos e industriais. A análise envolveu a caracterização da água antes e depois do tratamento, utilizando técnicas eletrométricas e espectrofotométricas, além da aplicação do teste de jarros para definir a dose ideal de coagulante e o tempo de decantação. Os resultados indicaram uma alta capacidade do sistema em remover a turbidez e a coloração da água, sem interferir negativamente no pH ou na condutividade elétrica, quando aplicado o coagulante natural Tanfloc SG. A dosagem ideal foi de 180 mililitros para 30 litros de água, com sedimentação em 17 minutos. Após o tratamento, os níveis de compostos como amônia, nitrato, nitrito, fosfato e sulfato estavam abaixo dos limites permitidos. Assim, o estudo conclui que a ultrafiltração, associada ao pré-tratamento com coagulante, é uma solução eficiente para o tratamento de água.

Jack et al (1998) analisaram o uso combinado de poli(cloreto de alumínio) (PAC) com a ultrafiltração no tratamento de água superficial de baixa qualidade. Os autores observaram que a aplicação do coagulante antes da etapa de filtração por membranas favoreceu a remoção de compostos orgânicos naturais, além de melhorar a eficiência do processo ao reduzir a obstrução das membranas. Essa abordagem também contribuiu para manter a estabilidade operacional e garantir uma qualidade superior da água tratada. O estudo reforça o potencial do sistema integrado como uma alternativa eficaz no tratamento de águas superficiais complexas.

3.4. ASPECTOS QUE AFETAM E AVALIAM O DESEMPENHO DA MEMBRANA

A eficiência de uma membrana está diretamente relacionada às condições operacionais e às características do fluido processado. Para monitorar seu desempenho, são utilizados

indicadores como fluxo permeado, rejeição de solutos, diferença de pressão através da membrana e permeância. Alterações nesses parâmetros podem indicar processos que comprometem a eficiência da membrana, como incrustações (*fouling*) ou variações na alimentação. Assim, o monitoramento contínuo desses indicadores é essencial para assegurar o funcionamento adequado e a durabilidade do sistema de separação por membranas.

3.4.1. FLUXO DE PERMEADO E PERMEÂNCIA

O fluxo de permeado é diretamente proporcional ao gradiente de pressão nos processos em que esse parâmetro atua como força motriz. No caso de membranas porosas, aplicando-se a Lei de Darcy, o fluxo pode ser determinado por meio da seguinte equação (BERNARDO,2017):

$$J = L_P \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (3.4.1.1)$$

J = Fluxo de permeado ($\frac{L}{h.m^2}$)

L_P = Permeabilidade da água ($\frac{L}{h.m.bar}$)

Δx = Espessura da membrana (m)

ΔP = Diferença de pressão através da membrana (bar)

A diferença de pressão através da membrana (ΔP) corresponde à diferença entre a pressão do lado do permeado, geralmente considerada como a pressão atmosférica, e a média aritmética das pressões de entrada e saída do compartimento da membrana.

Durante a ultrafiltração, a membrana encontra-se em estado compactado, o que impossibilita a definição precisa de sua espessura. Por esse motivo, o cálculo do fluxo é realizado com base na permeância hidráulica, que pode ser obtida por meio da seguinte equação.

$$K = \frac{L_P}{\Delta x} \quad (3.4.1.2)$$

K = Permeância hidráulica ($\frac{L}{m^2.h.bar}$)

Dessa forma, ao reescrever a equação do fluxo, obtém-se a seguinte expressão:

$$J = K \cdot \Delta P \quad (3.4.1.3)$$

O fluxo permeado é definido como a razão entre a vazão da corrente de permeado pela área de membrana utilizada para a permeação, apresentada na expressão a seguir:

$$J = \frac{Q_P}{A} \quad (3.4.1.4)$$

Q_P = Vazão da corrente de permeado

A = Área da membrana

A permeância hidráulica serve como parâmetro para avaliar o desempenho das membranas em processos de filtração com água. Trata-se de uma propriedade influenciada tanto pelas características da membrana, como o tipo de material e sua estrutura, quanto pelas características da solução tratada e pelas condições em que o sistema opera.

3.4.2. RETENÇÃO

A retenção é definida como a fração da substância presente na alimentação que é retida pela membrana, podendo ser calculada por meio da seguinte equação (BERNARDO,2017):

$$R = 1 - \frac{C_P}{C_A} \quad (3.4.2.1)$$

R = Retenção

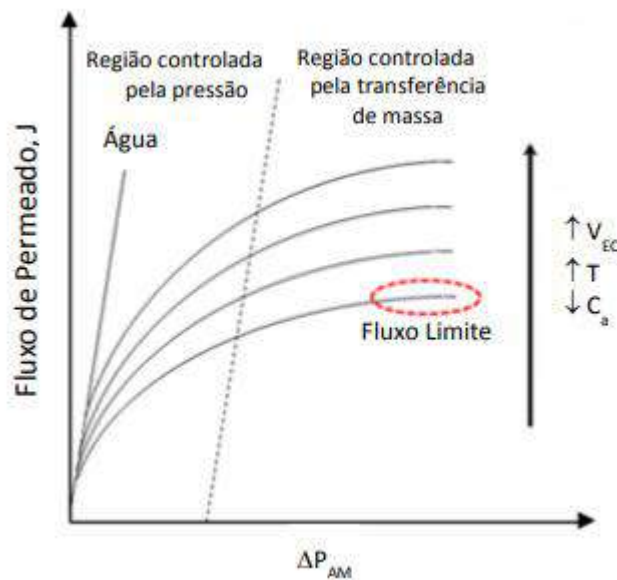
C_P = Concentração da substância no permeado

C_A = Concentração da substância na alimentação

3.4.3. INFLUÊNCIA DO DIFERENCIAL DE PRESSÃO NA EFICIÊNCIA DA MEMBRANA

O aumento do diferencial de pressão através da membrana favorece o acúmulo de soluto na região próxima à sua superfície, o que gera uma barreira adicional à passagem do solvente. Como mostrado na Figura 3.4.3. 1, observa-se um crescimento proporcional do fluxo de solvente permeado enquanto o diferencial de pressão se mantém em níveis baixos. Entretanto, com o aumento dessa pressão, a concentração de soluto se eleva, intensificando a resistência ao escoamento. Como consequência, o fluxo de solvente atinge um valor constante, que permanece inalterado mesmo com novas elevações de pressão. Esse valor constante é denominado fluxo limite.

Figura 3.4.3. 1– Desempenho do fluxo do permeado conforme a variação da pressão através da membrana.

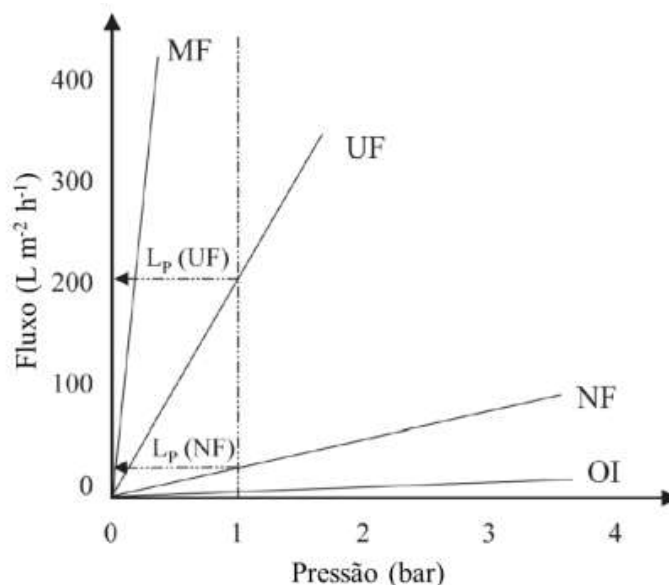


Fonte: WESCHENFELDER, 2015.

Quando se utiliza um solvente puro, o fluxo de permeado tende a aumentar de forma proporcional ao acréscimo da pressão aplicada, desde que a membrana já esteja previamente estabilizada, ou seja, que não apresente alterações estruturais decorrentes da compressão. A Figura 3.4.3. 2 ilustra perfis típicos do comportamento do fluxo de permeado em função da

pressão para distintos tipos de membranas utilizadas em processos de separação por membranas (BERNARDO,2017).

Figura 3.4.3. 2– Fluxo de água pura para diferentes PSM em função da pressão de operação do processo.

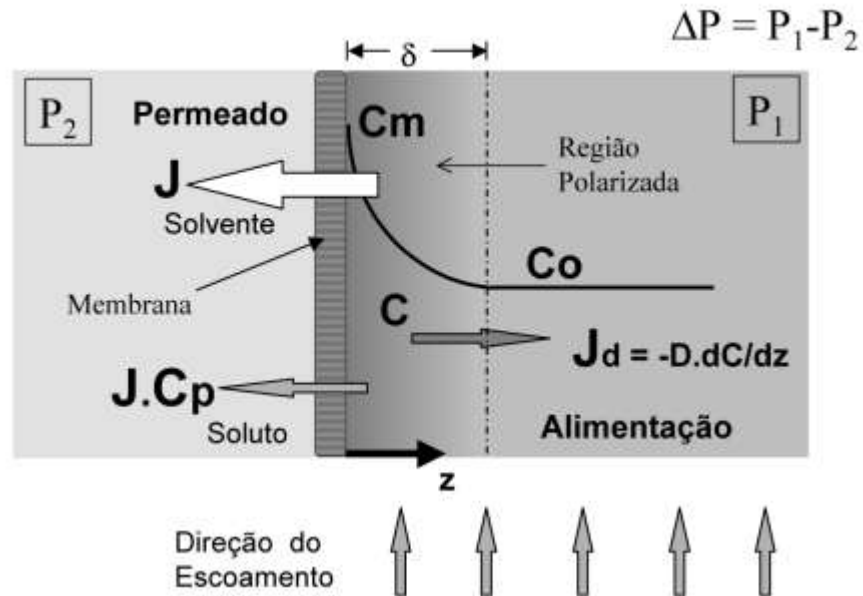


Fonte: HABERT et al.,2006.

3.4.4. POLARIZAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO E INCRUSTAÇÃO

Durante o tratamento de soluções contendo compostos de baixa massa molar ou macromoléculas por meio de processos de separação por membranas, observa-se, em razão da seletividade intrínseca da técnica, uma elevação da concentração das substâncias retidas nas proximidades da interface da membrana, independentemente de o sistema operar em modo frontal ou tangencial. Esse acúmulo próximo à superfície, denominado como polarização da concentração, ocorre porque a concentração local do soluto excede a existente no interior da solução, o que desencadeia um fluxo difusivo no sentido oposto, ou seja, do gradiente mais concentrado para o menos concentrado (Figura 3.4.4. 1). No caso específico da filtração frontal, mesmo com a presença desse retorno difusivo, a tendência dominante é o contínuo acúmulo de soluto junto à superfície da membrana, caracterizando um comportamento transiente do processo (HABERT et al.,2006).

Figura 3.4.4. 1- Polarização de concentração.

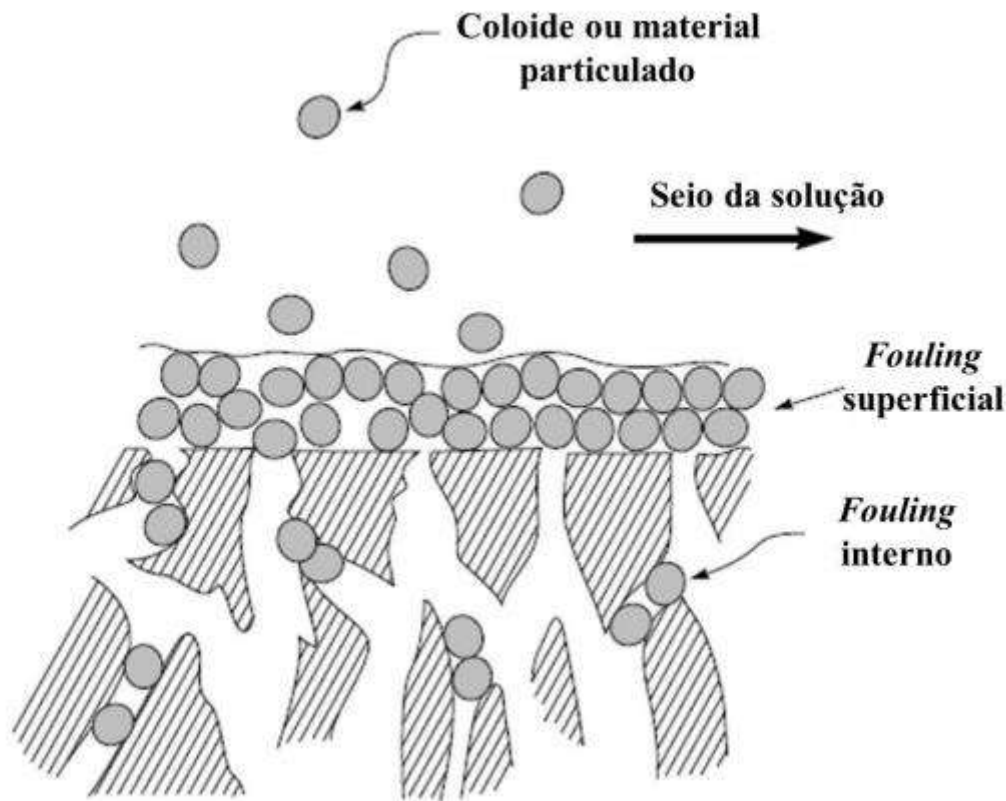


Fonte: HABERT et al.,2006.

Nos processos de separação por membranas com estrutura porosa, é comum observar uma redução gradual no fluxo de permeado ao longo do tempo. Esse comportamento indica a presença de efeitos adicionais à polarização de concentração. A diminuição no fluxo de permeado está frequentemente relacionada à formação de camadas ou acúmulos junto à superfície da membrana, que alteram o perfil de passagem dos componentes da solução (HABERT et al.,2006).

O fenômeno responsável por esse acúmulo é conhecido como incrustação (fouling) e corresponde à deposição de partículas dissolvidas, coloidais ou em suspensão sobre a superfície e/ou no interior dos poros da membrana, como ilustrado na Figura 3.4.4. 2. Esse processo inclui mecanismos como adsorção das moléculas de soluto, entupimento dos poros e depósitos de material em suspensão nas membranas (BERNARDO,2017).

Figura 3.4.4. 2– Incrustação superficial e interna em membranas porosas.



Fonte: BERNARDO,2017.

Um dos principais mecanismos responsáveis pela perda de desempenho em processos com membranas é a adsorção. Nesse processo, moléculas da solução alimentada apresentam afinidade com o material da membrana e acabam se fixando à sua superfície ou penetrando nos seus poros. Essa adesão ocorre devido a interações físico-químicas (HABERT et al.,2006).

Outro mecanismo importante é o entupimento de poros, que consiste na obstrução física causada por partículas suspensas ou moléculas de maior tamanho. Esse bloqueio pode ocorrer tanto na superfície quanto no interior da membrana, dependendo de sua estrutura. Em membranas anisotrópicas, com poros mais estreitos localizados superficialmente, a obstrução tende a ocorrer na face externa. Já em membranas isotrópicas, com distribuição uniforme de poros, o entupimento pode se dar ao longo de toda a espessura do material (HABERT et al.,2006).

Além disso, pode ocorrer o depósito de material em suspensão sobre a superfície da membrana, formando uma camada compacta conhecida como torta de filtração. Em soluções que contêm macromoléculas, a concentração dessas substâncias pode se elevar a tal ponto na

região próxima à membrana que leva à formação de uma estrutura semelhante a um gel. Por outro lado, solutos de baixa massa molar, como sais, podem atingir o limite de solubilidade e precipitar na superfície, formando depósitos sólidos que dificultam ainda mais a permeação (HABERT et al.,2006).

3.5. LIMPEZA DAS MEMBRANAS

Com o uso contínuo das membranas, é comum que partículas sólidas presentes na água se acumulem em seu interior, dificultando a passagem do líquido. Esse acúmulo faz com que o sistema perca eficiência, o que pode ser percebido pela queda na vazão de água ou pelo aumento da pressão necessária para manter o processo funcionando. Para resolver esse problema, existe um processo chamado contra lavagem, que acontece de forma automática sempre que a pressão atinge um certo limite ou após um tempo programado. Nesse procedimento, a direção do fluxo de água é invertida: em vez de seguir o caminho normal, a água limpa (o permeado) é enviada de volta pela membrana, ajudando a remover os resíduos acumulados (PEIG,2011).

Além da contra lavagem, pode-se usar a limpeza com ar, que consiste em injetar ar para promover turbulência e soltar impurezas aderidas na superfície da membrana. Esse tipo de limpeza também é automático e costuma ser feito junto com a contra lavagem, aumentando a eficácia da remoção de impurezas (PEIG,2011).

Em situações em que esses métodos não são suficientes para recuperar o desempenho da membrana, é necessária a limpeza química. Nesse caso, são utilizadas soluções com produtos específicos, como ácidos, bases e detergentes, que circulam pelos módulos para eliminar impurezas mais resistentes e micro-organismos que possam estar formando biofilmes. Existem dois tipos principais de limpeza química: a limpeza de manutenção, que é mais rápida e realizada com frequência para evitar o acúmulo de sujeiras; e a limpeza de recuperação, que é mais demorada e indicada quando a membrana já apresenta perda significativa de desempenho (PEIG,2011).

3.6. PROGRAMAS DE DIMENSIONAMENTO DE PROCESSOS DE UF

Diversos fabricantes de membranas desenvolvem e disponibilizam softwares gratuitos para download, voltados ao dimensionamento de sistemas de ultrafiltração. Essas ferramentas, são voltadas exclusivamente aos produtos da própria marca, o que

restringe a comparação entre diferentes tecnologias e fornecedores. Um exemplo é o WAVE, da DuPont.

O WAVE é um programa de computador desenvolvido para projetar estações de tratamento de água, combinando diferentes tecnologias, como ultrafiltração, osmose inversa e resinas de troca iônica. Criado em 2017, esse programa substituiu as ferramentas individuais anteriormente usadas para cada processo. Entre suas principais funcionalidades estão: definição dos parâmetros iniciais do projeto, detalhamento da qualidade da água de entrada, escolha das membranas dentre as opções fornecidas pela DuPont. Porém o software não oferece um banco de dados para o preço dos materiais (WARMLING et al., 2024).

A Toray, assim como a DuPont, oferece um programa de dimensionamento que calcula parâmetros operacionais, incluindo fluxos, duração dos ciclos, diagramas de fluxo e eficiência do sistema. No entanto, a ferramenta da Toray não disponibiliza informações sobre preços ou custos do sistema, para orçamentos, é necessário contatar diretamente a empresa ou seus representantes comerciais (TORAY,2025).

O trabalho atual visa desenvolver um programa por meio de Excel/VBA, com capacidade de calcular os dados operacionais, fornecer um banco de membranas de diferentes fornecedores, além de calcular o custo operacional e de investimento, por meio de um banco de dados. As interfaces foram desenvolvidas para facilitar o projeto de um sistema de ultrafiltração, auxiliando a escolha das condições de operação e determinação dos consumos específicos e da demanda de energia.

4 METODOLOGIA

4.1 PROCESSO E ROTINAS DE ULTRAFILTAÇÃO.

O dimensionamento do programa se baseia no processo de UF na configuração *dead-end*, com o fluxo da alimentação dentro do módulo sendo *outside-in*, quando a alimentação flui de fora para dentro das fibras. A força motriz é o diferencial de pressão, a qual a bomba de alimentação (B-101) proporciona. Na planta, os módulos são distribuídos em trens montados sobre skids (estruturas metálicas de suporte), como ilustrado na Figura 4.1. 1.

Figura 4.1. 1- Ilustração de um skid com dois trens.



Fonte: Disponibilizado pela Pam Membranas.

A planta possui oito linhas principais, conforme indicado no fluxograma da Figura 4.1. 2. Dependendo da configuração adotada, essas linhas podem ser duplicadas, triplicadas ou sofrer outras variações. Por exemplo, se a bomba de alimentação for comum a todos os trens, ela fornecerá vazão para todos os módulos. Entretanto, se a alimentação for individual por trem, cada trem contará com sua própria bomba, resultando no aumento da quantidade de linhas de alimentação. Essa lógica também se aplica às demais bombas, sopradores e compressores. A Tabela 4.1. 2 apresenta as linhas com suas respectivas identificações e os componentes que as integram, enquanto a Tabela 4.1. 1 exibe as identificações (tags) e os nomes dos componentes.

Figura 4.1. 2-Fluxograma base do processo de UF.

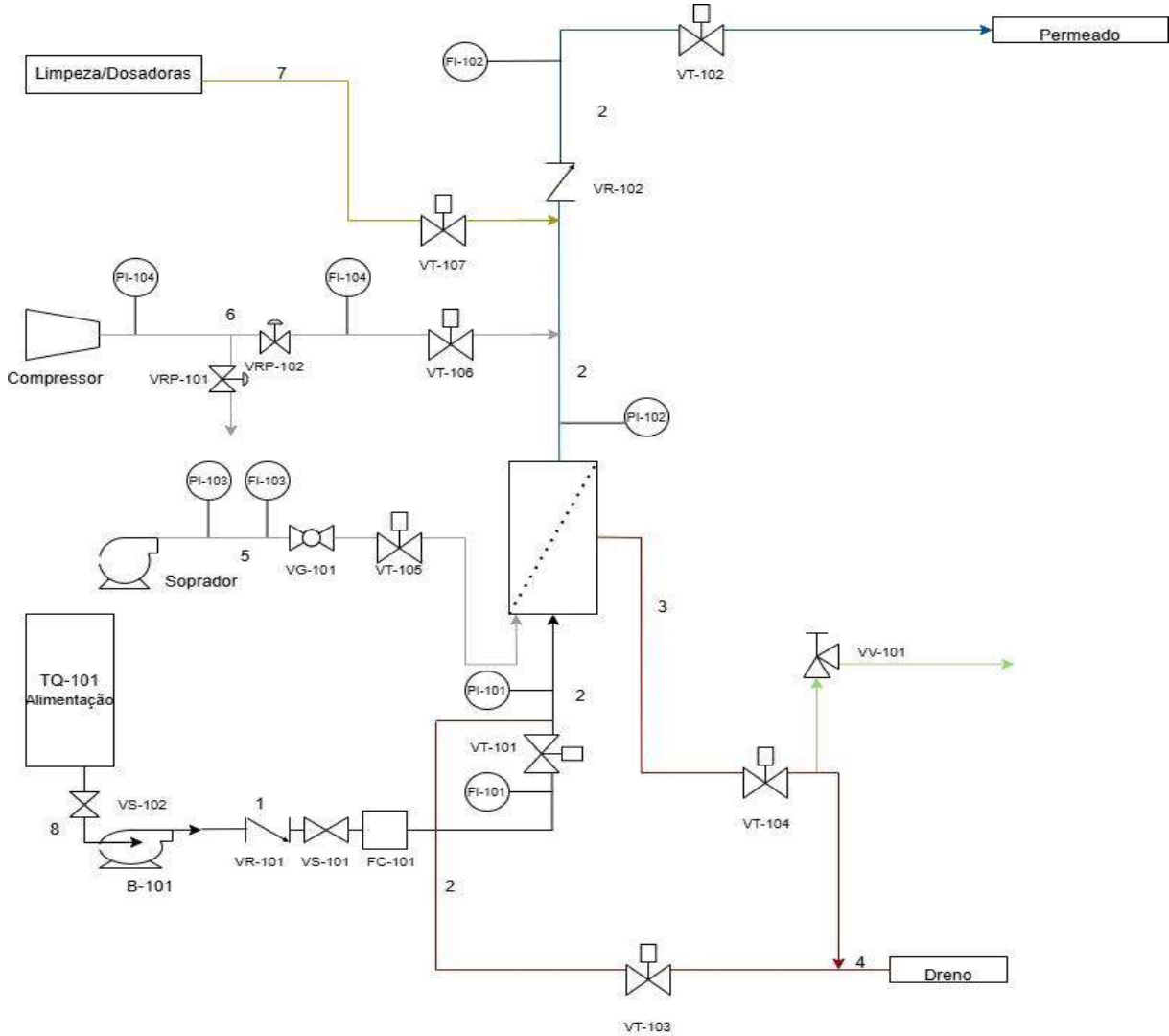


Tabela 4.1. 1-Componentes e as respectivas tags do fluxograma de processo.

TAG	Componentes
B-101	Bomba de alimentação
VR	Válvula de Retenção
VS	Válvula Esfera
VT	Válvula Atuadora
VRP	Válvula Reguladora de Pressão
VV	Válvula Ventosa
VG	Válvula Globo
TQ-101	Tanque de Alimentação
FC-101	Filtro de Material Particulado
FI	Indicador de Vazão
PI	Indicador de Pressão

Tabela 4.1. 2-Identificação e componentes das linhas.

Linhas	Identificação	Componentes
Linha 1	Alimentação	B-101; VR-101; VS-101; FC-101
Linha 2	Alimentação/ Permeado/Dreno da alimentação	FI-101;VT-101;PI-101;PI102;VR-102, VT-102,FI-102; VT-103
Linha 3	Dreno do concentrado	VT-104; VV-101
Linha 4	Dreno Geral	
Linha 5	Soprador	PI-103; FI-103; VG-101; VT-105
Linha 6	Compressor	PI-104; VRP-101; VRP-102; FI-104; VT-106
Linha 7	Limpeza e Dosadoras	VT-107
Linha 8	Recalque da alimentação	VS-102

O aplicativo foi desenvolvido com base nas rotinas de operação usadas para o funcionamento adequado da planta de UF. Cada etapa da rotina possui uma duração predefinida pelo operador da planta. Ao fim de uma etapa, a próxima se inicia, fazendo com que o sistema funcione em ciclos. A rotina de filtração ocorre em 4 etapas: enchimento, filtração, borbulhamento e drenagem. A água a ser tratada é armazenada em um tanque (TQ-101) e depois bombeada pela B-101 para alimentar os módulos de UF. Na etapa de enchimento, os módulos são preenchidos com a água a ser tratada usando a bomba de alimentação B-101. Em seguida começa a etapa de filtração, onde a B-101 pressuriza os módulos, criando a força motriz necessária para a filtração. Ao término do tempo de filtração, inicia-se a etapa de borbulhamento de ar pela ação do soprador SP-101, essa etapa é importante porque gera turbulência, ajudando a soltar o material depositado na superfície da membrana. Por último, os módulos são drenados

a partir da linha de alimentação da unidade, completando o ciclo e deixando o sistema pronto para iniciar um novo ciclo de filtração.

Durante a etapa de filtração, o permeado é direcionado ao tanque de armazenamento TQ-102, onde fica pronto para uso conforme a necessidade do cliente. O permeado também é utilizado para a realização de procedimentos de limpeza química dos módulos.

A limpeza química da planta deve ser realizada regularmente para garantir a manutenção e a recuperação da permeabilidade das membranas. A limpeza de manutenção e de recuperação segue as mesmas etapas, mas diferem em tempo, frequência e concentração dos químicos. A limpeza de manutenção é realizada em menor tempo, com concentrações menores de produtos químicos e maior frequência em comparação à limpeza de recuperação.

A Figura 4.1. 3 apresenta o fluxograma da unidade de limpeza do processo de UF. A Tabela 4.1. 3 exibe os componentes e suas respectivas tags, enquanto a Tabela 4.1. 4 apresenta a identificação das linhas e os componentes que as constituem. A depender da configuração, a quantidade dessas linhas também pode variar.

Figura 4.1. 3- Fluxograma da unidade de limpeza da UF.

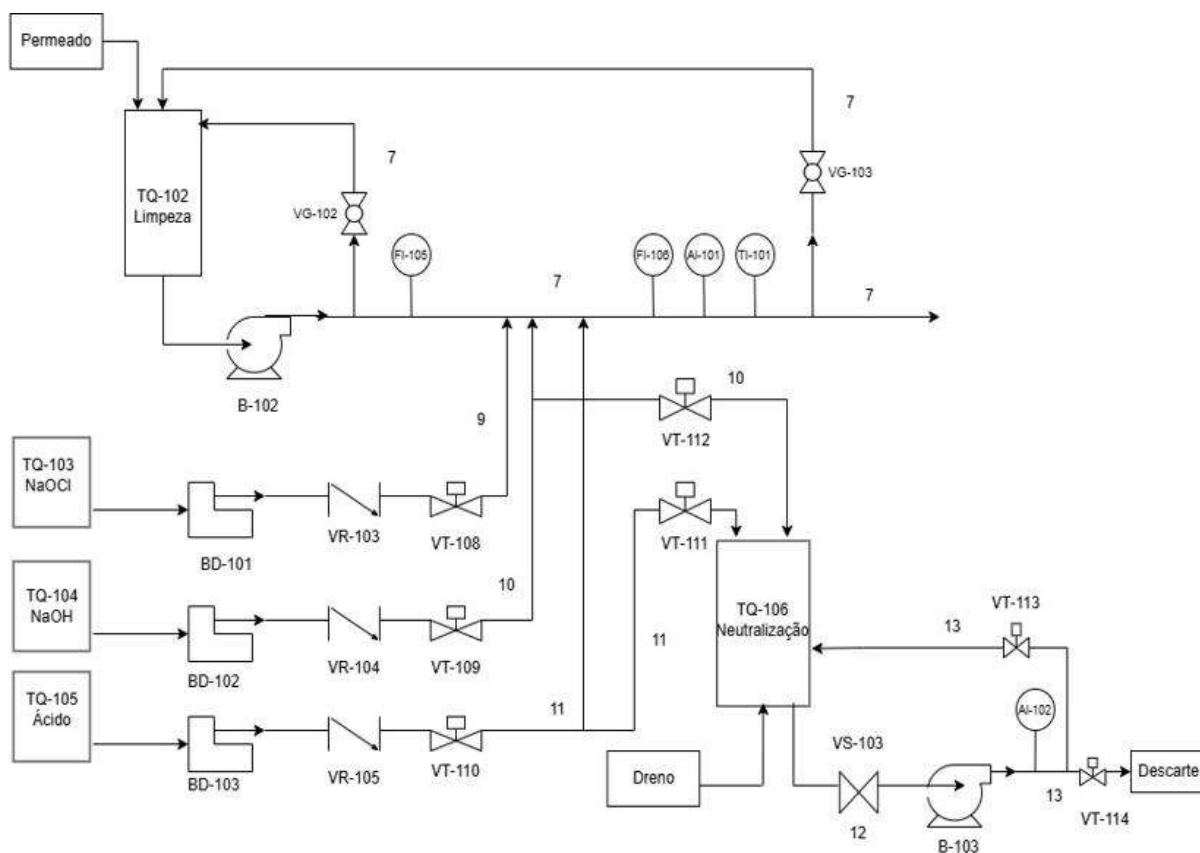


Tabela 4.1. 3-Componentes e as respectivas tags do fluxograma da unidade de limpeza.

TAG	Componentes
B-102	Bomba de Limpeza
TI	Indicador de Temperatura
AI	Indicador de Condutividade
B-103	Bomba de Descarte
BD-101	Bomba de Dosagem NaOCl
BD-102	Bomba de Dosagem NaOH
BD-103	Bomba de Dosagem Ácido
TQ-102	Tanque de Permeado/Limpeza
TQ-103	Tanque de Armazenamento: NaOCl
TQ-104	Tanque de Armazenamento:NaOH
TQ-105	Tanque de Armazenamento: Ácido
TQ-106	Tanque de Neutralização

Tabela 4.1. 4- Identificação e componentes das linhas de limpeza.

Linhas	Identificação	Componentes
Linha 7	Limpeza	B-102; VG-102; VG-103; FI-105; FI-106; AI-101; TI-101
Linha 9	NaOCl	BD-101; VR-103; VT-108
Linha 10	NaOH	BD-102; VR-104; VT-109; VT-112
Linha 11	Ácido	BD-103; VR-105; VT-110; VT-111
Linha 12	Recalque do Descarte	VS-103
Linha 13	Descarte	B-103; AI-102; VT-113; VT-114

A limpeza química pode ser realizada por meio de duas rotinas. A primeira utiliza uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) combinada com hipoclorito de sódio (NaClO), para remoção de compostos orgânicos incrustantes. A segunda rotina emprega ácido cítrico ($C_6H_8O_7$), para remoção de incrustantes inorgânicos. As soluções são armazenadas em tanques específicos e dosadas por bombas dosadoras correspondentes: a BD-101 para o NaClO, a BD-102 para o NaOH e a BD-103 para o ácido cítrico.

Durante o procedimento de limpeza, as soluções químicas são bombeadas juntamente com o permeado por meio da bomba de limpeza B-102, em direção aos módulos de membranas, no sentido oposto ao da filtração. O soprador é utilizado nesta etapa.

As rotinas de limpeza seguem as seguintes etapas: enchimento, molho, borbulhamento, drenagem, *flush*, segundo borbulhamento, segunda drenagem e segundo *flush*.

Na etapa de enchimento, os módulos são preenchidos com as soluções de limpeza. Em seguida, ocorre o período de molho, em que as soluções permanecem em contato com os módulos por um período determinado. Após isso, realiza-se o primeiro borbulhamento pela ação do soprador, seguido da primeira drenagem, feita pela linha de alimentação da unidade.

Na sequência, executa-se o primeiro *flush*, que consiste no preenchimento dos módulos com água de alimentação da unidade, simultaneamente à drenagem pela linha de permeado, com o intuito de remover a solução de limpeza do sistema. Depois, ocorre um novo ciclo de borbulhamento e drenagem, tanto pela linha de alimentação quanto pela linha de permeado, finalizando com o segundo *flush*.









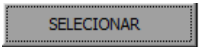


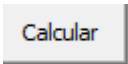











Após a realização da limpeza química de recuperação, é necessário executar um teste de integridade. Esse procedimento tem como objetivo verificar se os módulos de membranas permanecem íntegros e não sofreram danos durante a operação. O teste é iniciado com a pressurização dos módulos por meio do compressor. Em seguida, todas as válvulas são fechadas para possibilitar a verificação da estanqueidade dos módulos. Por fim, os módulos são preenchidos com a água que será submetida ao processo de tratamento.

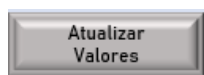
O resíduo gerado durante as etapas de drenagem e das limpezas químicas é armazenado em um tanque de neutralização e descarte (TQ-106). Nesse tanque, as dosadoras BD-102 e BD-103 adicionam base ou ácido, respectivamente, para neutralizar o efluente. Uma bomba de descarte (B-103), recircula o líquido até que a neutralização seja concluída, procedendo então com o descarte final.

4.2 FUNCIONAMENTO BÁSICO E PADRONIZAÇÃO DO PROGRAMA

O programa foi desenvolvido no programa Excel, utilizando a ferramenta VBA, com o objetivo de otimizar os cálculos e tornar a interação com o usuário mais simples. Para isso, foram criados botões, distribuídos nas interfaces conforme apresentado na Tabela 4.2. 1.

Tabela 4.2. 1- Botões do aplicativo.

Layout dos botões	Função	Função	Layout dos botões
	Avançar para a próxima interface		Direciona o usuário para a interface “Químicos”
	Voltar para a interface anterior		Direciona o usuário para a interface “Principais Componentes”
	Exibe uma imagem com as instruções da interface.		
	Selecionar dados		Direciona o usuário para a interface “Custo de Operação”
			
			Direciona o usuário para a interface “Custo de Materiais”
	Executar macros e calcular parâmetros		
			Direciona o usuário ao formulário destinado à configuração do tempo de “Filtração”
	Direciona o usuário para a interface “Início”		
	Direciona o usuário para a interface “Banco Membranas”		Direciona o usuário ao formulário destinado à configuração do tempo da “Manutenção”
	Direciona o usuário para a interface “Tempos”		Direciona o usuário ao formulário destinado à configuração do tempo da “Recuperação”
	Direciona o usuário ao formulário destinado à configuração dos parâmetros “PAC”		Apaga todas as interfaces
	Direciona o usuário à interface com todos os materiais e seus respectivos preços		Apagar interface atual
			Direciona o usuário à interface do Relatório



Atualiza os preços dos materiais



Imprimi o Relatório ou salva em PDF



Direciona ao banco de dados de preços dos materiais

Os botões que foram configurados com a atribuição de macros, conforme ilustrado na Figura 4.2. 1, foram utilizados para rodar os códigos de cálculo de parâmetros ou abertura de formulários. Já os botões destinados à troca de interface receberam apenas um hiperlink, conforme demonstrado na Figura 4.2. 2.

Figura 4.2. 1-Configurações dos botões com macros.

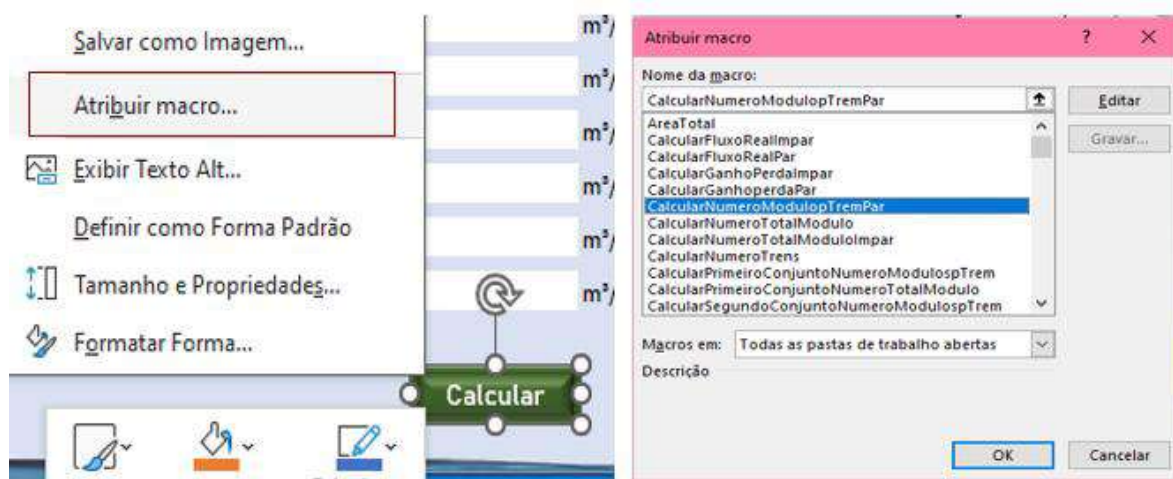
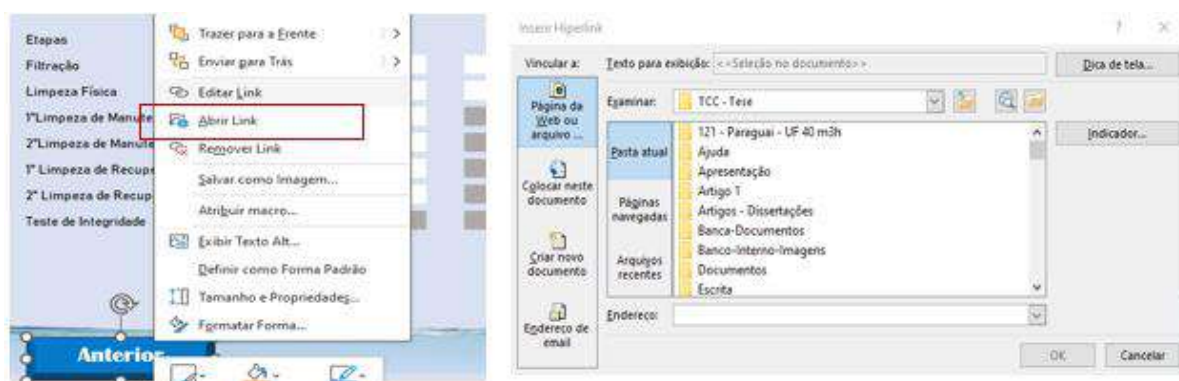


Figura 4.2. 2- Configurações dos botões com hiperlinks.



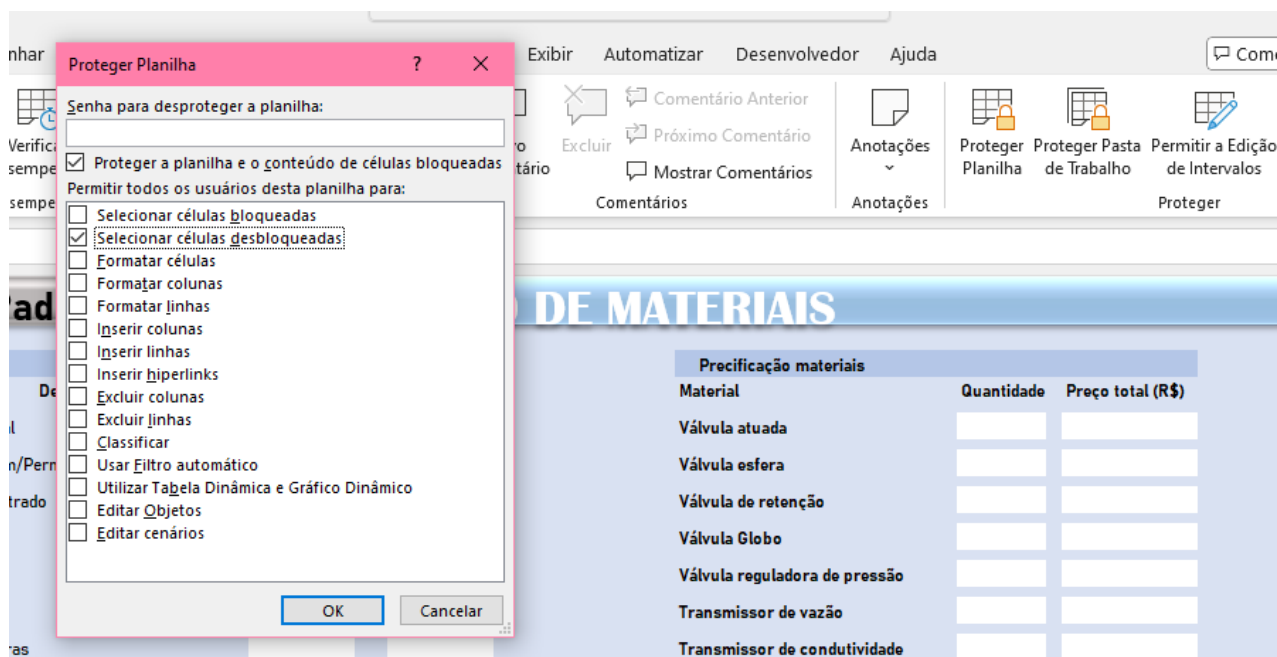
As células destacadas em cinza nas interfaces foram padronizadas como editáveis, enquanto as em branco estão bloqueadas, sendo resultados da automação do aplicativo.

Durante a interação do usuário com o programa, é necessário preencher os valores dos parâmetros desejados. No entanto, o aplicativo também sugere opções de preenchimento para auxiliar no dimensionamento. Os valores sugeridos foram fornecidos pela empresa Pam Membranas e obtidos por meio de pesquisas com fornecedores.

As unidades dos parâmetros seguem as mais comumente utilizadas, definidas com base em uma pesquisa realizada com os engenheiros projetistas da Pam Membranas, a fim de melhorar a experiência do usuário.

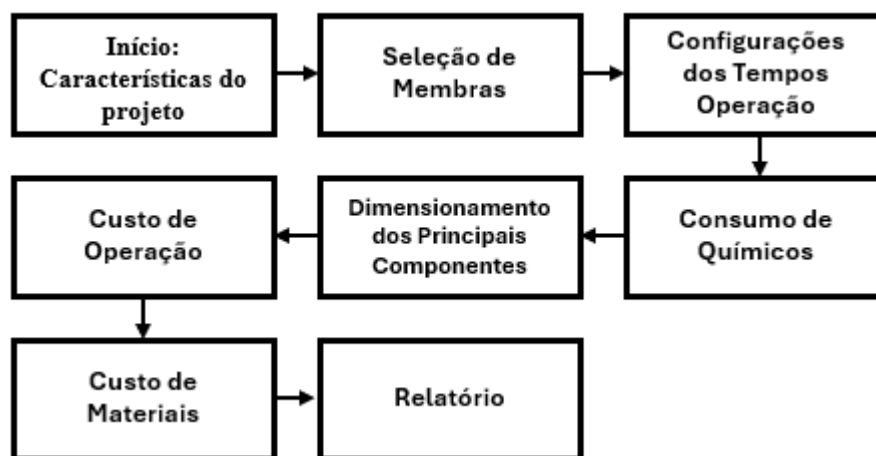
Para proteger o funcionamento do programa, as planilhas foram bloqueadas, conforme demonstrado na Figura 4.2. 3. Para uma melhor experiência do usuário, o aplicativo também é executado em tela cheia. Além disso, em razão da parceria, o layout do programa incorpora as cores e o logotipo da Pam Membranas.

Figura 4.2. 3- Proteção de planilha.



4.3 ETAPAS DO PROGRAMA

O aplicativo segue uma sequência lógica de etapas, o usuário deve preencher cada interface para assegurar o dimensionamento correto, como ilustrado no diagrama a seguir. Se o usuário desejar retornar a uma etapa, poderá fazê-lo, desde que pressione os botões identificados como “Calcular” para atualizar os valores das telas.



4.3.1. INÍCIO: CARACTERÍSTICAS DO PROJETO

A primeira interface do programa destina-se ao cadastro das informações do projeto, incluindo dados do cliente e características do projeto, que servirão como identificação básica. Conforme especificado na Tabela 4.3.1. 1, o projetista deve preencher todos os campos obrigatórios nesta etapa inicial.

Tabela 4.3.1. 1- Dados de entrada da primeira interface

Input
Nome da empresa
Email
Telefone
Celular
CNPJ
Responsável pelo projeto
Nome do projeto
Número do projeto
Localização
Afluente a ser tratado
Vazão de tratado(m ³ /h)

4.3.2 SELEÇÃO DE MEMBRANAS

A segunda interface tem como objetivo selecionar as membranas e calcular os parâmetros descritos na Tabela 4.3.2. 1, a partir do preenchimento de três informações essenciais: o fluxo operacional desejado, o número de trens e a quantidade de skids necessários.

Tabela 4.3.2. 1-Dados de entrada e saída da segunda interface.

Input	Output
Seleção de Membrana	Módulo
Fluxo Operacional	Área/Módulo
Número de trens	Área requerida
Número de skids	Vazão de permeado
	Vazão de permeado instantânea
	Número de módulos
	Número de módulos por trem
	Volume morto por módulo
	Vazão por trem
	Volume morto por trem
	Volume morto total
	Fluxo médio corrigido
	Vazão de ar por módulo
	Vazão de ar por trem
	Vazão de ar total
	Recomendações
	Número de trens
	Configuração Par:
	Número de módulo por trem
	Número total de módulo
	Fluxo real par
	Configuração ímpar:
	1ºConjunto
	Número de módulos por trem
	Número de trem
	2ºConjunto
	Número de módulo por trem
	Número de trem
	Total
	Número total de módulos
	Fluxo real ímpar

O VBA calcula parte dos parâmetros listados acima e obtém os demais através de consulta sistemática ao banco de dados das membranas.

A vazão de permeado instantânea é calculada pela Equação 4.3.2.1. Os valores 24 e 60 correspondem, respectivamente, ao tempo de 24 horas e aos 60 minutos que compõem uma hora.:

Onde:

V_{pins} = Vazão de permeado instantânea (m³/h)

V_p = Vazão de permeado (m³/h-Dado de entrada)

A área requerida é calculada por meio da Equação 4.3.2.2:

$$A_{requerida} = \frac{V_{pins} \cdot 1000}{F_{op}} \quad (4.3.2.2)$$

$$V_{pins} = \frac{V_p \cdot 24 \cdot 60}{Tempo \ de \ Filtracao} \quad (4.3.2.1)$$

Onde:

$A_{requerida}$ = Área requerida (m²)

F_{OP} = Fluxo operacional (L/h.m²)

O número de módulos é calculado pela Equação 4.3.2.3:

$$N_{modulos} = \frac{A_{requerida}}{A/modulo} \quad (4.3.2.3)$$

Onde:

$N_{modulos}$ = Número de módulos

$A/modulo = \acute{A}$ rea por m3dulo (m²-Banco de dados)

O n3mero de m3dulos por trem 3 calculado por meio da Equa33o 4.3.2.4. Recomenda-se que o projetista n3o ultrapasse o limite de 10 m3dulos por trem, a fim de garantir o dimensionamento adequado do sistema. Caso esse valor seja excedido, o programa exibir3 uma mensagem de alerta. Essa limita33o se deve ao fato de que, em projetos de maior porte, 3 necess3rio considerar par3metros adicionais no dimensionamento.

$$N_{modulo/trem} = \frac{N_{modulos}}{N_{trem}} \quad (4.3.2.4)$$

Onde:

$N_{modulo/trem}$ = N3mero de m3dulos por trem

N_{trem} = N3mero de trens (Dados de entrada)

A vaz3o de permeado por trem 3 calculada de acordo com a Equa33o 4.3.2.5.

$$V/trem = \frac{V_P}{N_{trem}} \quad (4.3.2.5)$$

Onde:

$V/trem$ = Vaz3o de permeado por trem (m³/h)

O volume morto por m3dulo foi calculado com base em suas dimens3es, utilizando a Equa33o 4.3.2.6. Considerou-se que as membranas de fibra oca ocupam aproximadamente 55% do volume total do m3dulo, resultando em um volume morto de 45% (BAKER, 2012)..

$$V_{morto} = \frac{\pi \cdot (\frac{D}{2})^2 \cdot C \cdot 0,45}{1000000} \quad (4.3.2.6)$$

Onde:

V_{morto} = Volume morto por m3dulo (L)

D = Diâmetro do módulo (mm)

C = Comprimento do módulo (mm)

Os valores foram previamente calculados para cada módulo em uma planilha auxiliar. Ao pressionar o botão “Calcular”, o projetista transfere automaticamente o valor correspondente do volume morto do módulo selecionado para a segunda interface.

Já o volume morto por trem é calculado com a Equação 4.3.2.7.

$$V_{morto/trem} = N_{modulo/trem} \cdot V_{morto} \quad (4.3.2.7)$$

Onde:

$V_{morto/trem}$ = Volume morto por trem (L)

O volume morto total é calculado por meio da Equação 4.3.2.8.

$$V_{morto\ total} = V_{morto} \cdot N_{modulos} \quad (4.3.2.8)$$

Onde:

$V_{morto\ total}$ = Volume morto total (L)

O fluxo médio corrigido é obtido a partir da Equação 4.3.2.9.

$$F_{medio\ corrigido} = \frac{V_p \cdot 1000}{A_{requerida}} \quad (4.3.2.9)$$

Onde:

$F_{medio\ corrigido}$ = Fluxo médio corrigido (L/h.m²)

A vazão de ar por trem é calculada utilizando a Equação 4.3.2.10.

$$V_{ar/trem} = V_{ar/modulo} \cdot N_{modulo/trem} \quad (4.3.2.10)$$

Onde:

$V_{ar/trem}$ = Vazão de ar por trem (Nm³/h)

$V_{ar/modulo}$ = Vazão de ar por módulo (Nm³/h – Banco de dados)

Já a vazão total de ar pode ser calculada por meio da Equação 4.3.2.11.

$$V_{ar\ total} = V_{ar/modulo} \cdot N_{modulos} \quad (4.3.2.11)$$

Onde:

$V_{ar\ total}$ = Vazão de ar total (Nm³/h)

A quantidade de trens, tanto para a configuração com número par quanto ímpar de módulos por trem, é determinada por meio da Equação 4.3.2.12.

$$N_{trem\ rec} = \frac{N_{modulos}}{N_{max\ trem}} \quad (4.3.2.12)$$

Onde:

$N_{trem\ rec}$ = Número de trens recomendados

$N_{max\ trem}$ = Número máximo de trens = 10

Se o número de trens recomendados não for um número inteiro, o VBA aproxima para o valor acima mais próximo.

O número de módulos por trem, na configuração par, é calculado por meio da Equação 4.3.2.13. O resultado é então arredondado para o número inteiro imediatamente superior.

$$N_{\frac{modulo}{trem}\ par} = \frac{N_{modulos}}{N_{trem\ rec}} \quad (4.3.2.13)$$

Onde:

$N_{\frac{modulo}{trem}par}$ = Número de módulos por trem, configuração par.

A partir do número de módulos por trem, pode-se então calcular o número total de módulos par com a Equação 4.3.2.14.

$$N_{modulototalpar} = N_{\frac{modulo}{trem}par} \cdot N_{trem\ rec} \quad (4.3.2.14)$$

Onde:

$N_{modulototalpar}$ = Número total de módulos, configuração par.

Com os parâmetros da configuração par, pode-se calcular o fluxo corrigido por meio da Equação 4.3.2.17. No entanto, para determinar essa variável, é necessário calcular a perda com base no fluxo operacional previamente obtido a partir dos dados de entrada. Para isso, calcula-se a vazão de permeado na configuração par (Equação 4.3.2.15) e, em seguida, a perda, utilizando a Equação 4.3.2.16.

$$V_{ppar} = \frac{N_{modulototalpar} \cdot A/modulo \cdot F_{OP}}{1000} \quad (4.3.2.15)$$

Onde:

V_{ppar} = Vazão de permeado, configuração par (m³/h).

$$P_{par} = \frac{V_{ppar}}{V_{pins}} - 1 \quad (4.3.2.16)$$

Onde:

P_{par} = Perda no fluxo operacional, configuração par.

$$F_{par} = F_{OP} \cdot (1 - P_{par}) \quad (4.3.2.17)$$

Onde:

F_{par} = Fluxo, configuração par (L/h.m²).

Para a configuração ímpar, os trens são divididos em dois conjuntos distintos com número de módulos por trem diferentes. Para determinar a configuração dos conjuntos, são determinados o número de trens e o número de módulos por trem. O número de trens para o primeiro conjunto é determinado por meio de duas Equações a 4.3.2.18 e a 4.3.2.19.

Se o $N_{trem\ rec}$ for maior ou igual a 2, a expressão utilizada é a Equação 4.3.2.18.

$$N_{1tremip} = N_{trem\ rec} - 1 \quad (4.3.2.18)$$

Onde:

$N_{1tremip}$ = Número de trens no primeiro conjunto, configuração ímpar.

Se o $N_{trem\ rec}$ for menor que 2, a expressão utilizada é a Equação 4.3.2.19.

$$N_{1tremip} = N_{\frac{modulo}{trem}par} - 1 \quad (4.3.2.19)$$

Antes de calcular o número de módulos por trem do primeiro conjunto, por meio da Equação 4.3.2.21, é necessário calcular primeiro o número total de módulos da configuração ímpar, utilizando a Equação 4.3.2.20.

$$N_{modulototalimpar} = N_{modulos} - 1 \quad (4.3.2.20)$$

Onde:

$N_{modulototalimpar}$ = Número total de módulos, configuração ímpar.

Com o $N_{modulototalimpar}$ pode-se seguir para a Equação 4.3.2.21.

$$N_{1modulotremip} = \frac{N_{modulototalimpar}}{N_{trem\ rec}} \quad (4.3.2.21)$$

Onde:

$N_{1modulotremip}$ = Número de módulos por trem no primeiro conjunto, configuração ímpar.

Para calcular o número de trens do segundo conjunto é utilizado a Equação 4.3.2.22.

$$N_{2tremip} = N_{trem\ rec} - N_{1tremip} \quad (4.3.2.22)$$

Onde:

$N_{2tremip}$ = Número de trens no segundo conjunto, configuração ímpar.

Com o $N_{2tremip}$ calculado, o número de módulos por trem pode ser calculado por meio da Equação 4.3.2.23.

$$N_{2modulotremip} = N_{modulototalimpar} - (N_{1modulotremip} \cdot N_{1tremip}) \quad (4.3.2.23)$$

Onde:

$N_{2modulotremip}$ = Número de módulos por trem no segundo conjunto, configuração ímpar.

Com os parâmetros da configuração ímpar, pode-se repetir o procedimento realizado na configuração par para calcular o fluxo corrigido, por meio da Equação 4.3.2.26. O cálculo da vazão de permeado na configuração ímpar é feito pela Equação 4.3.2.24 e, em seguida, o ganho com base no fluxo operacional é obtido por meio da Equação 4.3.2.25.

$$V_{pimpar} = \frac{N_{modulototalimpar} \cdot A/modulo \cdot F_{OP}}{1000} \quad (4.3.2.24)$$

Onde:

V_{pimpar} = Vazão de permeado, configuração ímpar (m³/h).

$$G_{impar} = \frac{V_{pimpar}}{V_{pins}} - 1 \quad (4.3.2.25)$$

Onde:

G_{impar} = Ganho no fluxo operacional, configuração ímpar.

$$F_{impar} = F_{OP} \cdot (1 - G_{impar}) \quad (4.3.2.26)$$

Onde:

F_{impar} = Fluxo, configuração ímpar (L/h.m²).

4.3.3 CONFIGURAÇÕES DOS TEMPOS

A terceira tela tem como objetivo configurar os tempos de operação. Inicialmente, são preenchidos os formulários de filtração, limpeza de manutenção e limpeza de recuperação, com tempos recomendados ou sugeridos conforme as Tabelas: Tabela 4.3.3. 1, Tabela 4.3.3. 2 e Tabela 4.3.3. 3. O volume consumido por trem é preenchido automaticamente nos formulários, com base nos dados calculados na segunda interface.

Tabela 4.3.3. 1- Sugestões de tempos de filtração.

Etapas	Tempo (minutos)
Filtração	40
Borbulhamento	1
Dreno	1,33
Enchimento	0,5

Tabela 4.3.3. 2 - Sugestões de tempos da limpeza de manutenção.

Etapas	Tempo (minutos)
Enchimento	2
Molho	10
1º Borbulhamento	5
1º Dreno	1,33
1º Flush	0,5
2º Borbulhamento	1
2º Dreno	1
2º Flush	0,5

Tabela 4.3.3. 3-Sugestões de tempos da limpeza de recuperação.

Etapas	Tempo (minutos)
Enchimento	10
1º Molho	45
1º Borbulhamento	5
2º Molho	45
2º Borbulhamento	5
1º Dreno	1
1º Flush	0,5
3º Borbulhamento	1
2º Dreno	1
2º Flush	0,5

Após o preenchimento dos formulários, o usuário deve iniciar a segunda etapa de inserção de dados. Nessa fase, o programa apresenta uma tabela cujas colunas exibem os dados de saída, incluindo: duração por etapa, frequência, duração diária ou mensal, volume consumido por trem, volume consumido por trem por dia ou por mês, e o volume total consumido diariamente ou mensalmente. Para essa etapa, o programa também fornece sugestões para as frequências das rotinas e duração do teste de integridade, conforme a Tabela 4.3.3. 4.

Tabela 4.3.3. 4- Sugestões para a segunda etapa de configuração de tempos.

Etapas	Frequência	Duração (minutos)
1º Limpeza de Manutenção (NaOH +NaClO)	1/dia	-
2º Limpeza de Manutenção (Ácido Cítrico)	0,3/dia	-
1º Limpeza de Recuperação	1/mês	-
2º Limpeza de Recuperação	1/mês	-
Teste de Integridade	1/mês	10

O primeiro parâmetro da tela é referente à duração de cada etapa, e seus valores são obtidos a partir dos formulários preenchidos pelo usuário. Os dados inseridos nos formulários

são copiados para uma planilha auxiliar, que realiza o cálculo da soma dos tempos das rotinas. Após o usuário pressionar o botão “Calcular”, esses valores são transferidos para a terceira interface.

O tempo de filtração é copiado da primeira linha do formulário de tempos do ciclo de filtração. Já os tempos das limpezas de recuperação e manutenção correspondem à soma dos tempos de cada etapa dessas respectivas limpezas, calculada pelo próprio formulário.

Já o tempo de limpeza física é calculado por meio da Equação 4.3.3.1:

$$T_{Limpfis} = T_{totalfiltra} - T_{filtra} \quad (4.3.3.1)$$

Onde:

$T_{Limpfis}$ = Tempo da limpeza física (minutos).

$T_{totalfiltra}$ = Tempo total da rotina de filtração (minutos).

T_{filtra} = Tempo de filtração (minutos).

A frequência diária de filtração e de limpeza física é a mesma e não é inserida manualmente, sendo calculada automaticamente pelo programa por meio da Equação 4.3.3.2.

$$Fr_{filtra} = \frac{(24.60) - (D_{1m} \cdot Fr_{1m}) - (D_{2m} \cdot Fr_{2m}) - (D_{1r} \cdot Fr_{1r}) - (D_{2r} \cdot Fr_{2r}) - (D_l \cdot Fr_l)}{T_{filtra} + T_{limpfis}} \quad (4.3.3.2)$$

Onde:

Fr_{filtra} = Frequência diária de filtração (por dia).

D_{1m} = Duração da 1º limpeza de manutenção (minutos).

Fr_{1m} = Frequência da 1º limpeza de manutenção (por dia).

D_{2m} = Duração da 2º limpeza de manutenção (minutos).

Fr_{2m} = Frequência da 2º limpeza de manutenção (por dia).

D_{1r} = Duração da 1º limpeza de recuperação (minutos).

Fr_{1r} = Frequência da 1º limpeza de recuperação (por mês).

D_{2r} = Duração da 2º limpeza de recuperação (minutos).

Fr_{2r} = Frequência da 2ª limpeza de recuperação (por mês).

D_I = Duração do teste de integridade (minutos).

Fr_I = Frequência do teste de integridade (por mês).

A duração mensal e diária é calculada para todas as etapas por meio da Equação geral 4.3.3.3.

$$D_{mesoudia} = Fr_{etapa} \cdot D \quad (4.3.3.3)$$

Onde:

$D_{mesoudia}$ = Duração mensal ou diária de cada etapa (minutos).

Fr_{etapa} = Frequência mensal ou diária de cada etapa.

D = Duração de cada etapa (minutos).

O volume gasto por trem é apresentado previamente nos formulários, e foi calculado com base no volume morto selecionado na segunda interface. Vale ressaltar, que na filtração não há gasto de volume, visto que está produzindo permeado.

O volume gasto por trem na limpeza física e no teste de integridade é igual ao volume gasto na etapa de dreno durante a rotina de filtração, e é obtido pela Equação 4.3.3.4.

$$V_{gtemdreno} = \frac{V_{morto/trem}}{1000} \quad (4.3.3.4)$$

Onde:

$V_{gtemdreno}$ = Volume gasto por trem no dreno (m³).

O volume gasto por trem na limpeza de manutenção e na recuperação, pode ser calculado por meio da Equação 4.3.3.5.

$$V_{gtremlimp} = 2 \cdot \frac{V_{morto/trem}}{1000} + 2 \cdot \frac{V_{morto/trem}}{1000} \cdot 0,2 \quad (4.3.3.5)$$

Onde:

$V_{gtremlimp}$ = Volume gasto por trem nas limpezas (m³).

O volume gasto por trem diariamente ou mensalmente para cada etapa, pode ser calculado por meio da Equação 4.3.3.6.

$$V_{gtremdiames} = V_{gtem} \cdot Fr_{etapa} \quad (4.3.3.6)$$

Onde:

$V_{gtremdiames}$ = Volume gasto por trem diariamente ou mensalmente em cada etapa (m³).

V_{gtem} = Volume gasto por trem em cada etapa (m³).

Para determinar o volume total gasto diariamente ou mensalmente é preciso utilizar as Equações 4.3.3.7 e 4.3.3.8.

$$V_{gtotal} = V_{gtem} \cdot N_{trem} \quad (4.3.3.7)$$

Onde:

V_g = Volume gasto total em cada etapa (m³).

$$V_{gtotaldiaoumes} = V_g \cdot Fr_{etapa} \quad (4.3.3.8)$$

Onde:

$V_{gtotaldiaoumes}$ = Volume gasto total por dia ou mensalmente em cada etapa (m³).

O volume total gasto por dia é calculado por meio do somatório de todos os volumes, ajustando-se os valores para a escala diária. Após a finalização de todas as etapas da configuração dos tempos, o usuário pode avançar no programa.

4.3.4 CONSUMOS DE PRODUTOS QUÍMICOS

O objetivo desta tela é calcular o consumo de produtos químicos durante a operação da unidade. Os parâmetros de entrada dessa interface são: pH, concentrações das soluções, densidades e PAC (opcional). Os valores sugeridos para esses parâmetros estão descritos na Tabela 4.3.4. 1.

O formulário destinado ao PAC já vem preenchido com os valores recomendados para a concentração de íons alumínio (Al^{3+}) desejada, concentração da solução-mãe de PAC e densidade, que são, respectivamente, 1 mg/L, 18% e 1,4 kg/L. A vazão de alimentação da planta também é apresentada previamente, correspondendo à vazão instantânea de permeado, assim como a frequência de dosagem, que é igual à frequência da etapa de limpeza.

Após o preenchimento de todas as células editáveis, o usuário deve clicar no botão “Calcular”, e os demais parâmetros serão obtidos conforme as equações apresentadas a seguir.

Tabela 4.3.4. 1-Parâmetros e sugestões para a etapa de consumos químicos.

Parâmetros	NaOCl	NaOH	Ácido
Manutenção			
pH	-	12,57	-
Concentração: Solução Mãe (%)	12	50	2000g/L
Densidade da solução (Kg/L)	1,18	1,50	1,66
Concentração: Solução de Limpeza (mg/L)	200	-	2000
Recuperação			
pH		12,94	
Concentração: Solução Mãe (%)	12	50	2000g/L
Densidade da solução (Kg/L)	1,18	1,50	1,66
Concentração: Solução de Limpeza (mg/L)	1000	-	2000

Caso o projetista opte pela utilização de PAC, a vazão da bomba de dosagem será determinada por meio da Equação 4.3.4.1.

$$V_{BD\ PAC} = \frac{C_{Al}}{10000} \cdot V_A \cdot 1000 \quad (4.3.4.1)$$

$$D_{PAC} \cdot C_{mPAC}$$

Onde:

$V_{BD\ PAC}$ Vazão da bomba de dosagem PAC (L/h).

C_{Al} = Concentração de Al^{3+} (mg/L).

V_A = Vazão de alimentação da planta (m^3/h).

D_{PAC} = Densidade da solução mãe de PAC (Kg/L).

C_{mPAC} = Concentração da solução mãe de PAC (% m/m).

O consumo de PAC por dia é determinado por meio da Equação 4.3.4.2.

$$Co_{diaPAC} = V_{BD} \cdot Fr_{PAC} \left(\frac{T_{filtra}}{60} \right) \quad (4.3.4.2)$$

Onde:

Co_{diaPAC} = Consumo da solução de PAC por dia (L).

Fr_{PAC} = Frequência de dosagem de PAC (por dia).

Já o consumo por mês é obtido pela Equação 4.3.4.3.

$$Co_{mesPAC} = Co_{diaPAC} \cdot 30 \quad (4.3.4.3)$$

Onde:

Co_{mesPAC} = Consumo da solução de PAC por mês (L).

O Consumo da massa de PAC por mês é fornecido pela Equação 4.3.4.4.

$$Co_{massamesPAC} = Co_{mesPAC} \cdot D_{PAC} \quad (4.3.4.4)$$

Onde:

$Co_{massamesPAC}$ = Consumo de massa de PAC por mês (Kg).

Na etapa seguinte ao PAC, devem ser preenchidas as células editáveis, referentes aos parâmetros utilizados no cálculo do consumo de produtos químicos nas limpezas de recuperação e manutenção. Os químicos utilizados são ácido cítrico, hidróxido de sódio e hipoclorito de sódio.

Ao pressionar o botão “Calcular”, o programa exibe o volume de solução por trem, o tempo de enchimento e a vazão de alimentação durante a limpeza, tanto para a recuperação quanto para a de manutenção.

O volume de solução por trem, nas limpezas de manutenção e recuperação, é o mesmo e pode ser obtido pela Equação 4.3.4.5.

$$V_{solucao/trem} = \frac{V_{morto/trem}}{1000} \cdot 2 \quad (4.3.4.5)$$

Onde:

$V_{solucao/trem}$ = Volume de solução por trem (m^3).

O tempo de enchimento das limpezas de manutenção e de recuperação é obtido a partir dos formulários de configuração de tempo da terceira interface.

As vazões de alimentações nas limpezas podem ser calculadas por meio da Equação geral 4.3.4.6.

$$V_{ali,limp} = \frac{V_{solucao/trem}}{t_{enchimento}} \cdot \frac{60}{2} \quad (4.3.4.6)$$

Onde:

$V_{ali,limp}$ = Vazão de alimentação da solução de limpeza(m^3/h).

$t_{enchimento}$ = Tempo de enchimento(min).

As frequências de todas as limpezas são obtidas na terceira interface, na seção de configuração dos tempos, e copiadas para a quarta interface para utilização nos cálculos do consumo de produtos químicos.

A vazão da bomba de dosagem do NaOCl na manutenção e na recuperação é obtida pela Equação 4.3.4.7.

$$V_{BD,NaOCl} = \frac{V_{ali,limp} \cdot C_{limp,NaOCl}}{D_{NaOCl} \cdot C_{mae,NaOCl}} \cdot \frac{60}{2} \quad (4.3.4.7)$$

Onde:

$V_{BD,NaOCl}$ = Vazão da bomba de dosagem do NaOCl (L/h).

$C_{limp,NaOCl}$ = Concentração da solução de limpeza do NaOCl (mg/L).

$C_{mae,NaOCl}$ = Concentração da solução mãe do NaOCl (% m/m).

D_{NaOCl} = Densidade do NaOCl (Kg/L).

A concentração de limpeza do NaOH na recuperação e na manutenção é obtida por meio da Equação 4.3.4.8 e 4.3.4.9.

$$n_{OH} = 10^{-14+pH_{NaOH}} \quad (4.3.4.8)$$

Onde:

n_{OH} = Número de mols de OH^- da solução de NaOH.

pH_{NaOH} = pH da solução de NaOH.

$$C_{limp,NaOH} = n_{OH} \cdot 39,997.1000 \quad (4.3.4.9)$$

Onde:

$C_{limp,NaOH}$ = Concentração da solução de limpeza do NaOH (mg/L).

Com a $C_{limp,NaOH}$ calculada, a vazão da bomba de dosagem pode ser obtida pela Equação 4.3.4.10.

$$V_{BD,NaOH} = \frac{V_{ali,limp} \cdot C_{limp,NaOH}}{D_{NaOH} \cdot C_{mae,NaOH}} \cdot \frac{1000}{100} \quad (4.3.4.10)$$

Onde:

$V_{BD,NaOH}$ = Vazão da bomba de dosagem do NaOH (L/h).

$C_{mae,NaOH}$ = Concentração da solução mãe do NaOH (% m/m).

D_{NaOH} = Densidade do NaOH (Kg/L).

Já a vazão da bomba de dosagem do ácido é obtida pela Equação 4.3.4.11.

$$V_{BD,Ac} = \frac{V_{ali,limp} \cdot C_{limp,Ac}}{1000 \cdot (\frac{C_{mae,Ac}}{100})} \cdot 1000 \quad (4.3.4.11)$$

Onde:

$V_{BD,Ac}$ = Vazão da bomba de dosagem do Ácido (L/h).

$C_{limp,Ac}$ = Concentração da solução de limpeza do Ácido(mg/L).

$C_{mae,Ac}$ = Concentração da solução mãe do Ácido (g/L).

Por meio da Equação geral 4.3.4.12 pode-se determinar o consumo das soluções de limpeza por trem.

$$Co_{limpeza/trem} = \frac{V_{BD} \cdot t_{enchimento}}{60} \quad (4.3.4.12)$$

Onde:

$Co_{limpeza/trem}$ = Consumo da solução de limpeza por trem (L).

V_{BD} = Vazão da bomba de dosagem (L/h).

O consumo de solução de limpeza por dia pode ser obtido pela Equação geral 4.3.4.13.

$$Co_{limpeza/dia} = Co_{limpeza/trem} \cdot N_{trem} \cdot Fr_{limpeza} \quad (4.3.4.13)$$

Onde:

$Co_{limpeza/dia}$ = Consumo da solução de limpeza por dia (L).

$Fr_{limpeza}$ = Frequência de limpeza (por dia).

Já o consumo mensal é fornecido pela Equação geral 4.3.4.14.

$$Co_{limpeza/mes} = Co_{limpeza/dia} \cdot 30 \quad (4.3.4.14)$$

Onde:

$Co_{limpeza/mes}$ = Consumo da solução de limpeza por mês (L).

A massa consumida de NaOH e ácido por mês é obtida pela Equação geral 4.3.4.15.

$$Co_{massalimpeza/mes} = Co_{limpeza/mes} \cdot D_{limpeza} \quad (4.3.4.15)$$

Onde:

$Co_{massalimpeza/mes}$ = Consumo de massa de químicos por mês (Kg).

$D_{limpeza}$ = Densidade da solução de limpeza (Kg/L).

Já a massa consumida de ácido por mês é obtida pela Equação 4.3.4.16.

$$Co_{massaAc/mes} = \frac{Co_{Ac/mes} \cdot C_{mae,Ac}}{1000} \quad (4.3.4.16)$$

Onde:

$Co_{massaAc/mes}$ = Consumo de massa de ácido por mês (Kg).

$Co_{Ac/mes}$ = Consumo da solução de ácido por mês (L).

4.3.5 DIMENSIONAMENTO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES:

A quinta interface apresenta os principais componentes do sistema, que incluem: bomba de alimentação, soprador de ar, bomba de limpeza, bomba de descarte, bombas dosadoras e compressor de ar. O projetista deve preencher todas as células editáveis, referentes ao arranjo, quantidade de componentes em operação, quantidade de componentes reserva, pressão média, pressão máxima e eficiência. A partir dessas informações, serão calculados os parâmetros de saída, como potência, vazões e quantidade do componente em operação.

Nesta interface também são sugeridos alguns valores pelo programa conforme a Tabela 4.3.5. 1.

Tabela 4.3.5. 1-Parâmetros e sugestões para a configuração dos principais componentes.

Etapas	Bomba Alimentação	Soprador Ar	Bomba Limpeza	Bomba Descarte	Bomba Dosadoras	Bomba PAC	Compressor Ar
Quantidade em Operação	1	1	1	1	1	1	1
Quantidade em Reserva	1	1	1	1	1	1	1
Pressão média (bar)	1	0,40	1	1	0,50	5	4
Pressão máxima (bar)	3	0,70	3	3	2	5	4
Eficiência	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

As vazões médias dos componentes (dados de saída) são obtidas conforme a Tabela 4.3.5. 2.

Tabela 4.3.5. 2-Vazões médias dos componentes.

Componentes	Vazões Médias	Parâmetros
Bomba Alimentação	V_p	
Soprador Ar	$V_{ar\ total}$	
Bomba Limpeza	$\frac{V_{morto/trem} \cdot 60}{t_{enchimento} \cdot 10000}$	
Bomba Descarte	$\frac{V_{1gmanutencao} \cdot 6}{Fr_{1manutencao}}$	$V_{1gmanutencao}$ = Volume gasto na 1º limpeza de manutenção $Fr_{1manutencao}$ = Frequência da 1º limpeza de manutenção.
Bomba Dosadoras	V_{BD}	
Bomba PAC	$V_{BD\ PAC}$	
Compressor Ar	16,9 m³/h	

A vazão por componente é definida pela Equação geral 4.3.5.1.

$$V_{componente} = \frac{V_{media}}{Qtd_{op}} \quad (4.3.5.1)$$

Onde:

$V_{componente}$ = Vazão por componente (m³/h e L/h).

V_{media} = Vazão média do componente (m³/h e L/h).

Qtd_{op} = Quantidade do componente em operação.

Por intermédio da Equação geral 4.3.5.2 pode-se calcular a potência dos componentes. A densidade da água é levada em consideração, sendo está 997 kg/m³. As constantes 3600, 10,

75 e 735,499 correspondem às conversões necessárias para adequar as unidades utilizadas na equação: 3600 converte horas em segundos (1 h = 3600 s); 10 converte a pressão de bar para metros de coluna de água (1 bar \approx 10 mca); 75 converte a potência hidráulica para cavalos-vapor (HP); e 735,499 converte HP para watts (1 HP = 735,499 W), permitindo que o resultado final seja expresso em quilowatts (kW).

$$P = \frac{997 \cdot V_{media}}{3600} \cdot \frac{P_{media} \cdot 10}{75 \cdot ef} \cdot \frac{735,499}{1000} \quad (4.3.5.2)$$

Onde:

P = Potência consumida do componente (kW).

P_{media} = Pressão média do componente (bar).

ef = Eficiência do componente.

4.3.6 CUSTO DE OPERAÇÃO

A sexta interface apresenta os custos operacionais. Para o cálculo do custo dos produtos químicos, as massas consumidas mensalmente são copiadas da quarta interface (Químicos), e somam-se os consumos referentes às limpezas de manutenção e de recuperação, para cada produto químico, obtendo-se a massa total consumida. Com base nesse valor e no preço por quilograma, calcula-se o custo, realizando uma simples multiplicação. O programa fornece sugestões de valores conforme a Tabela 4.3.6. 1. O usuário deve preencher o custo por quilograma e, ao pressionar o botão “Calcular”, o programa determina o custo total.

Tabela 4.3.6. 1- Preços sugeridos para os custos operacionais.

-	Custo R\$
Químicos	
NaOCl	10 R\$/Kg
NaOH	10 R\$/Kg
Ácido Cítrico	25 R\$/Kg
PAC	30 R\$/Kg
Tarifa de Energia Elétrica	1,50R\$/kWh
Módulo de membrana	R\$22.700
Operador presencial	R\$6.000
Operador Remoto	R\$2.000

O custo de energia elétrica é calculado com base nos componentes que mais consomem eletricidade, sendo eles: bomba de alimentação, soprador de ar, bomba de limpeza, bomba de descarte, bomba de PAC e compressor de ar. Para o cálculo do custo mensal de cada componente, é considerado o consumo mensal, obtido a partir da potência consumida.

Antes de calcular o consumo mensal, precisa-se determinar o tempo de operação diário do componente. A partir da Equação 4.3.6.1 calcula-se o tempo diário da bomba de alimentação.

$$T_{alimentacao} = \frac{T_{filtra} + (t_{enchimento} \cdot Fr_{filtra}) + \left(\frac{T_{flush1} + T_{flush2}}{60} \cdot Fr_{1manut} \right) + \left(\frac{T_{flush1} + T_{flush1}}{60} \cdot Fr_{2manut} \right)}{60} \quad (4.3.6.1)$$

Onde:

$T_{alimentacao}$ = Tempo de operação diário da bomba de alimentação (h).

T_{flush1} = Tempo do primeiro flush (minutos).

T_{flush1} = Tempo do segundo flush (minutos).

Fr_{1manut} = Frequência da primeira limpeza de manutenção (por dia).

Fr_{2manut} = Frequência da segunda limpeza de manutenção (por dia).

Já o tempo diário do soprador é calculado por meio da Equação 4.3.6.2.

$$T_{soprador} = \frac{(T_{borb} + t_{enchimento}) \cdot Fr_{física} + T_1 \cdot Fr_{1manut} + T_1 \cdot Fr_{2manut} + T_2 \cdot \frac{Fr_{2rec}}{30}}{60} \quad (4.3.6.2)$$

Sendo $T_1 = T_{1borb} + T_{1dreno} + T_{2borb} + T_{2dreno}$ e $T_2 = T_{1borb} + T_{1dreno} + T_{2dreno}$.

Onde:

$T_{soprador}$ = Tempo de operação diário do soprador (h).

T_{borb} = Tempo de borbulhamento da etapa de filtração (minutos).

$Fr_{física}$ = Frequência da limpeza física (por dia).

T_{1borb} = Tempo primeiro borbulhamento (minutos).

T_{2borb} = Tempo segundo borbulhamento (minutos).

T_{1dreno} = Tempo primeiro dreno (minutos).

T_{2dreno} = Tempo segundo dreno (minutos).

Fr_{2rec} = Frequência da segunda limpeza de recuperação (por mês).

Já o tempo diário da bomba de limpeza é calculado por meio da Equação 4.3.6.3.

$$T_{limpeza} = \frac{t_{enchimento} \cdot (Fr_{1manut} + Fr_{2manut}) + t_{enchimento} \cdot \left(\frac{Fr_{1rec} + Fr_{2rec}}{30}\right)}{60} \quad (4.3.6.3)$$

Onde:

$T_{limpeza}$ = Tempo de operação diário da bomba de limpeza (h).

Fr_{1rec} = Frequência da primeira limpeza de recuperação (por mês).

Para a bomba de descarte o tempo diário é calculado pela Equação 4.3.6.4.

$$T_{descarte} = \left(\frac{V_{solucao/trem}}{2 \cdot V_{mediadescarte}} \right) \cdot (Fr_{1manut} + Fr_{2manut} + \frac{Fr_{1rec} + Fr_{2rec}}{30}) \quad (4.3.6.4)$$

Onde:

$T_{descarte}$ = Tempo de operação diário da bomba de descarte (h).

$V_{mediadescarte}$ = Vazão média da bomba de descarte (m³/h).

O tempo de operação da bomba dosadora de PAC é igual ao tempo diário de operação da bomba de alimentação. Já o tempo de operação do compressor é fixado em uma hora, considerando o tempo do teste de integridade e para o fornecimento de ar comprimido para os materiais pneumáticos.

Conhecido o tempo diário de operação dos componentes, os consumos mensais são calculados por meio da Equação geral 4.3.6.5.

$$Co_{mensaleletrica} = P \cdot T_{diario} \cdot 30 \quad (4.3.6.5)$$

Onde:

$Co_{mensaleletrica}$ = Consumo mensal de energia elétrica dos componentes (kWh).

T_{diario} = Tempo diário de operação dos componentes (h).

O custo de consumo mensal de cada componente é obtido pela Equação geral 4.3.6.6.

$$Cu_{mensaleletrica} = Co_{mensaleletrica} \cdot Tarifa \quad (4.3.6.6)$$

$Cu_{mensaleletrica}$ = Custo mensal de energia elétrica dos componentes (R\$/mês).

$Tarifa$ = Tarifa de energia elétrica (kWh).

Para calcular o custo mensal da membrana, utiliza-se a Equação 4.3.6.8. No entanto, antes disso, é necessário calcular o consumo mensal da membrana por meio da Equação 4.3.6.7. A vida útil da membrana é estimada em dois anos, adotando-se um valor conservador, visto que, com limpezas adequadas, as membranas de UF geralmente duram cerca de cinco anos, conforme informado pela Pam Membranas e seus fornecedores..

$$Co_{mensalmembrana} = \frac{N_{modulos}}{12.Vi_{membrana}} \quad (4.3.6.7)$$

Onde:

$Co_{mensalmembrana}$ = Consumo mensal de membranas (por mês).

$Vi_{membrana}$ = Vida útil da membrana (anos).

$$Cu_{mensalmembrana} = Cu_{unimembrana} \cdot Co_{mensalmembrana} \quad (4.3.6.8)$$

Onde:

$Cu_{mensalmembrana}$ = Custo mensal de membranas (R\$ por mês).

$Cu_{unimembrana}$ = Custo unitário da membrana (R\$).

Já o custo de mão de obra é dividido entre operador presencial e operador remoto. O usuário deve preencher os salários mensais e o número de operadores, e o programa calcula o custo total da mão de obra por meio de uma simples multiplicação. Em seguida, soma-se o custo dos operadores presenciais e remotos.

Por fim, o programa fornece o custo operacional total, calculado pela soma dos custos com produtos químicos, energia elétrica, reposição de membranas e mão de obra. Além disso, também é fornecida a produção mensal por meio da Equação 4.3.6.9.

$$V_{mensalproduzido} = V_p \cdot 24.30 \quad (4.3.6.9)$$

Onde:

$V_{mensalproduzido}$ = Volume mensal produzido (m³).

O custo por volume sem amortização também é calculado por meio da Equação 4.3.6.10.

$$Cu_{volume} = \frac{Cu_{total}}{V_{mensalproduzido}} \quad (4.3.6.10)$$

Onde:

Cu_{volume} = Custo por volume sem amortização (R\$/m³).

Cu_{total} = Custo operacional total (R\$).

4.3.7 CUSTO DE MATERIAIS E LISTAS DE MATERIAIS DETALHADAS

A sétima tela apresenta os diâmetros das linhas e suas respectivas vazões. As vazões são copiadas das interfaces anteriores e os diâmetros são copiados do banco interno do programa.

A interface também apresenta as quantidades e os valores dos seguintes componentes: válvulas atuadas, válvula esfera, válvula de retenção, válvula globo, válvula reguladora de pressão, transmissor de vazão, transmissor de condutividade, transmissor de temperatura, transmissor de pressão, bomba de alimentação, bomba de limpeza, bomba de descarte, bomba dosadora, soprador, compressor e filtro de material particulado. Esses valores são recuperados da interface “Lista de Materiais Detalhada”.

Na interface da Lista de Materiais, as linhas são quantificadas e, a partir dessa quantificação, os componentes associados a cada linha também são contabilizados. Por exemplo, se houver dois trens e uma bomba de alimentação para cada um, a linha correspondente será duplicada, assim como seus respectivos componentes.

As quantidades das linhas 1, referente à alimentação, é definida pela Equação 4.3.7.1.

$$Qtd_{Linha\ 1} = Qtd_{op-B101} \quad (4.3.7.1)$$

Onde:

$Qtd_{Linha\ 1}$ = Quantidade da linha 1.

$Qtd_{op-B101}$ = Quantidade da B-101 em operação.

A quantidade da linha 2, referente à alimentação por trem e a linha de permeado, e a quantidade da linha 3, referente ao dreno do concentrado, são calculadas pela Equação 4.3.7.2.

$$Qtd_{Linha\ 2,3} = N_{trem} \quad (4.3.7.2)$$

Onde:

$Qtd_{Linha\ 2,3}$ = Quantidade da linha 2 e 3.

A quantidade da linha 4, referente ao dreno total, é definida como 1. Já a quantidade da linha 5, referente ao soprador, é calculada pela Equação 4.3.7.3.

$$Qtd_{Linha\ 5} = Qtd_{op-SP101} \quad (4.3.7.3)$$

Onde:

$Qtd_{Linha\ 5}$ = Quantidade da linha 5.

$Qtd_{op-SP101}$ = Quantidade do SP-101 em operação.

Já a quantidade da linha 6 do compressor é definida pela Equação 4.3.7.4.

$$Qtd_{Linha\ 6} = Qtd_{op-CP101} \quad (4.3.7.4)$$

Onde:

$Qtd_{Linha\ 6}$ = Quantidade da linha 6.

$Qtd_{op-CP101}$ = Quantidade do CP-101 em operação.

A quantidade da linha 7, referente à linha de limpeza e às bombas dosadoras, é definida pela Equação 4.3.7.5.

$$Qtd_{Linha\ 7} = Qtd_{op-B102} \quad (4.3.7.5)$$

Onde:

$Qtd_{Linha\ 7}$ = Quantidade da linha 7.

$Qtd_{op-B102}$ = Quantidade da B-102 em operação.

A quantidade da linha 8, referente à sucção da B-101, é definida pela Equação 4.3.7.6.

$$Qtd_{Linha\ 8} = Qtd_{op-B101} \quad (4.3.7.6)$$

Onde:

$Qtd_{Linha\ 8}$ = Quantidade da linha 8.

$Qtd_{op-B101}$ = Quantidade da B-101 em operação.

As quantidades das linhas 9, 10 e 11 são definidas com base na quantidade de bombas dosadoras em operação, sendo calculadas pela Equação geral 4.3.7.7.

$$Qtd_{Linha\ 9,10,11} = Qtd_{op-BD} \quad (4.3.7.7)$$

Onde:

$Qtd_{Linha\ 9,10,11}$ = Quantidade das linhas 9,10 e 11.

Qtd_{op-BD} = Quantidade da BD em operação.

A quantidade da linha 12, referente à sucção da bomba de descarte, e a quantidade da 13, referente à linha de descarte, são definidas pela Equação 4.3.7.8.

$$Qtd_{Linha\ 12,13} = Qtd_{op-B103} \quad (4.3.7.8)$$

Onde:

$Qtd_{Linha\ 12,13}$ = Quantidade das linhas 12 e 13.

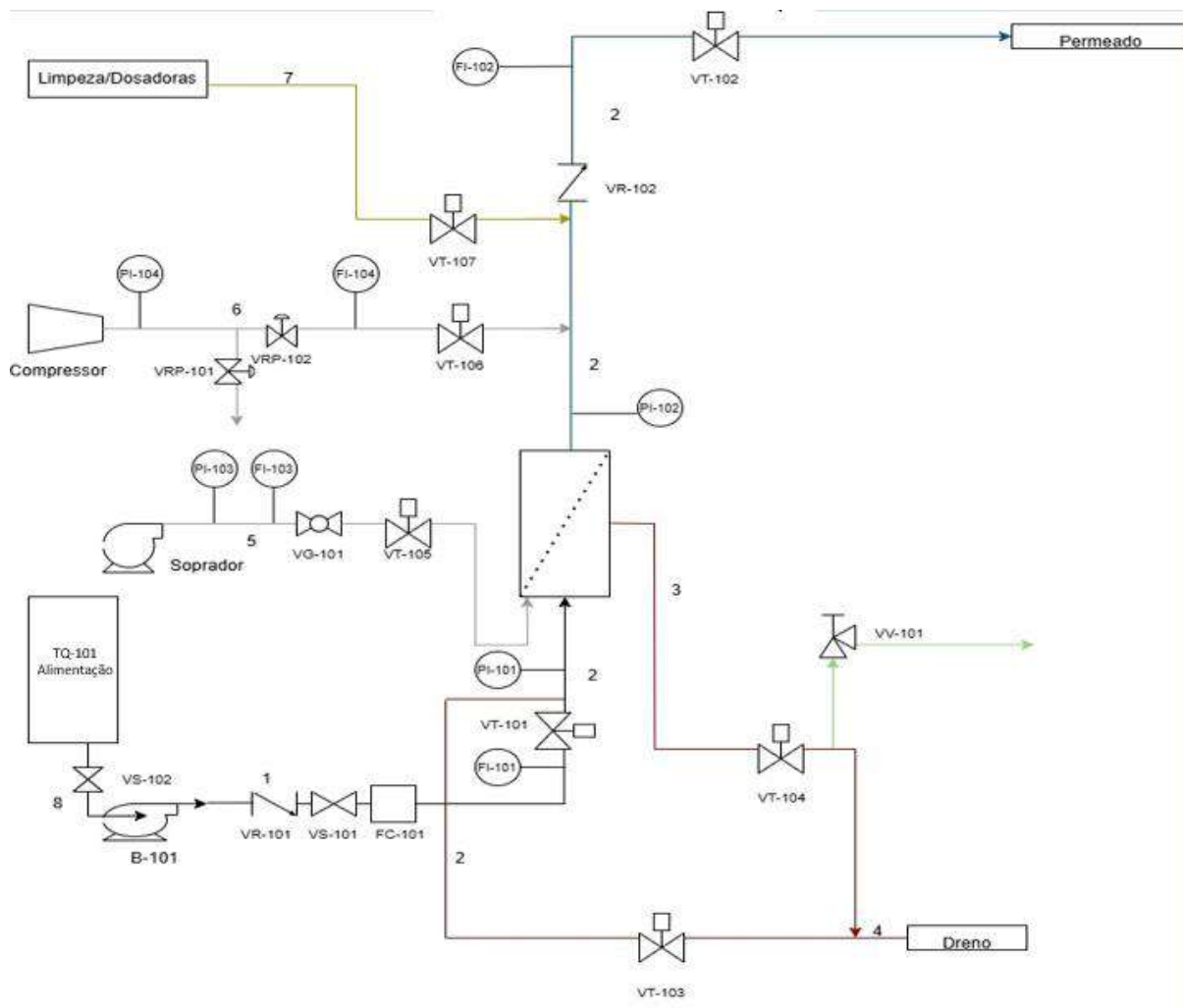
$Qtd_{op-B103}$ = Quantidade da B-103 em operação.

Conhecendo a quantidade das linhas e de seus respectivos componentes, bem como o diâmetro das tubulações, é possível calcular o custo de cada item. O programa permite o reconhecimento automático do diâmetro da linha e, conseqüentemente, dos diâmetros de seus componentes. O aplicativo, então, copia o valor correspondente do componente, especificado no banco de dados interno, para a interface “Lista de Materiais Detalhada”. O valor total é calculado com base no preço unitário (extraído do banco de dados) e na quantidade de cada item, com uma simples multiplicação.

Além disso, a interface da “Lista de Materiais Detalhada” também exibe os fluxogramas que melhor representam o processo. Os fluxogramas selecionados têm suas nomenclaturas destacadas em verde. O fluxograma da unidade de limpeza permanece selecionado em qualquer configuração.

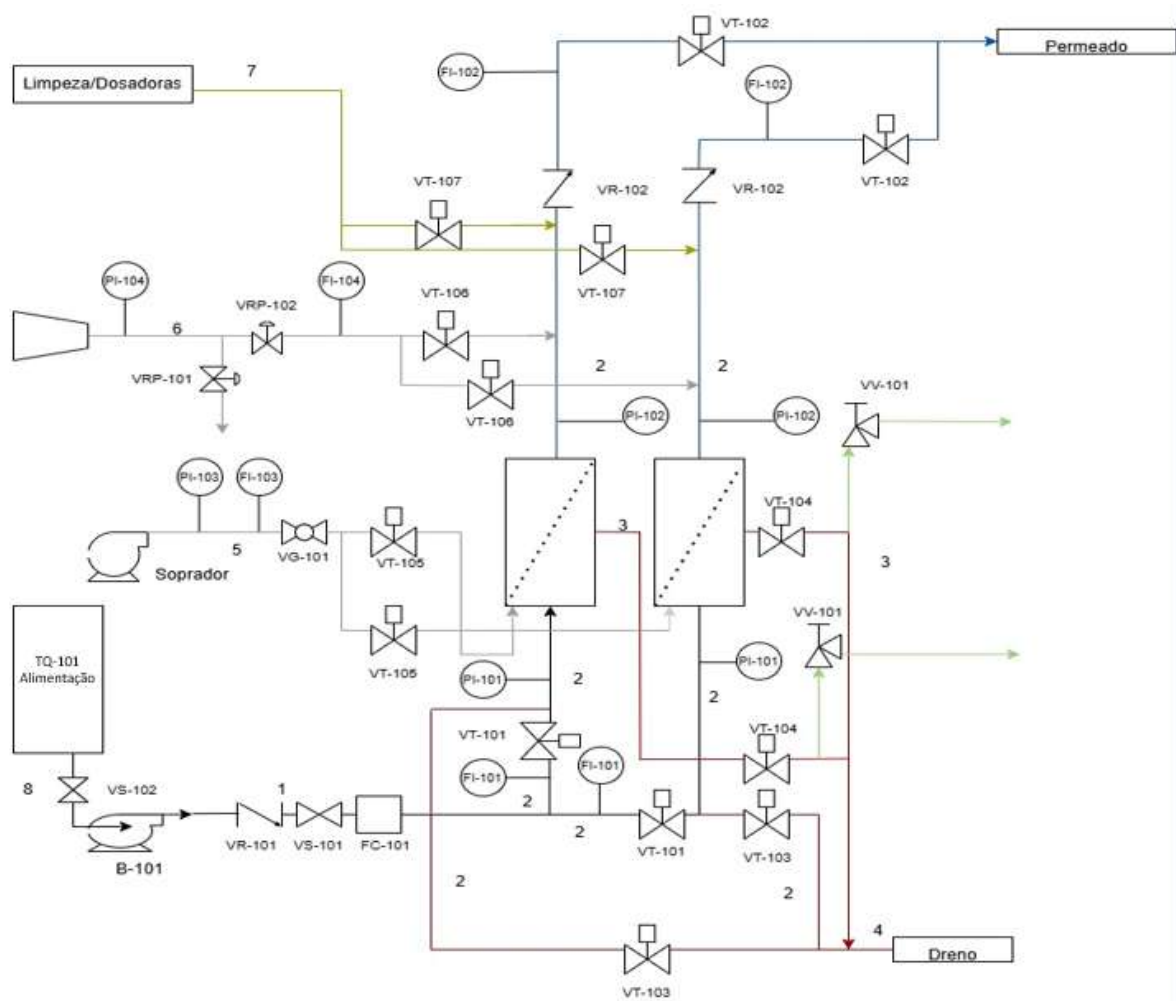
O fluxograma da Figura 4.3.7. 1 é selecionado quando são utilizados um trem e uma bomba de alimentação (B-101).

Figura 4.3.7. 1-Fluxograma: Uma bomba de alimentação e um trem.

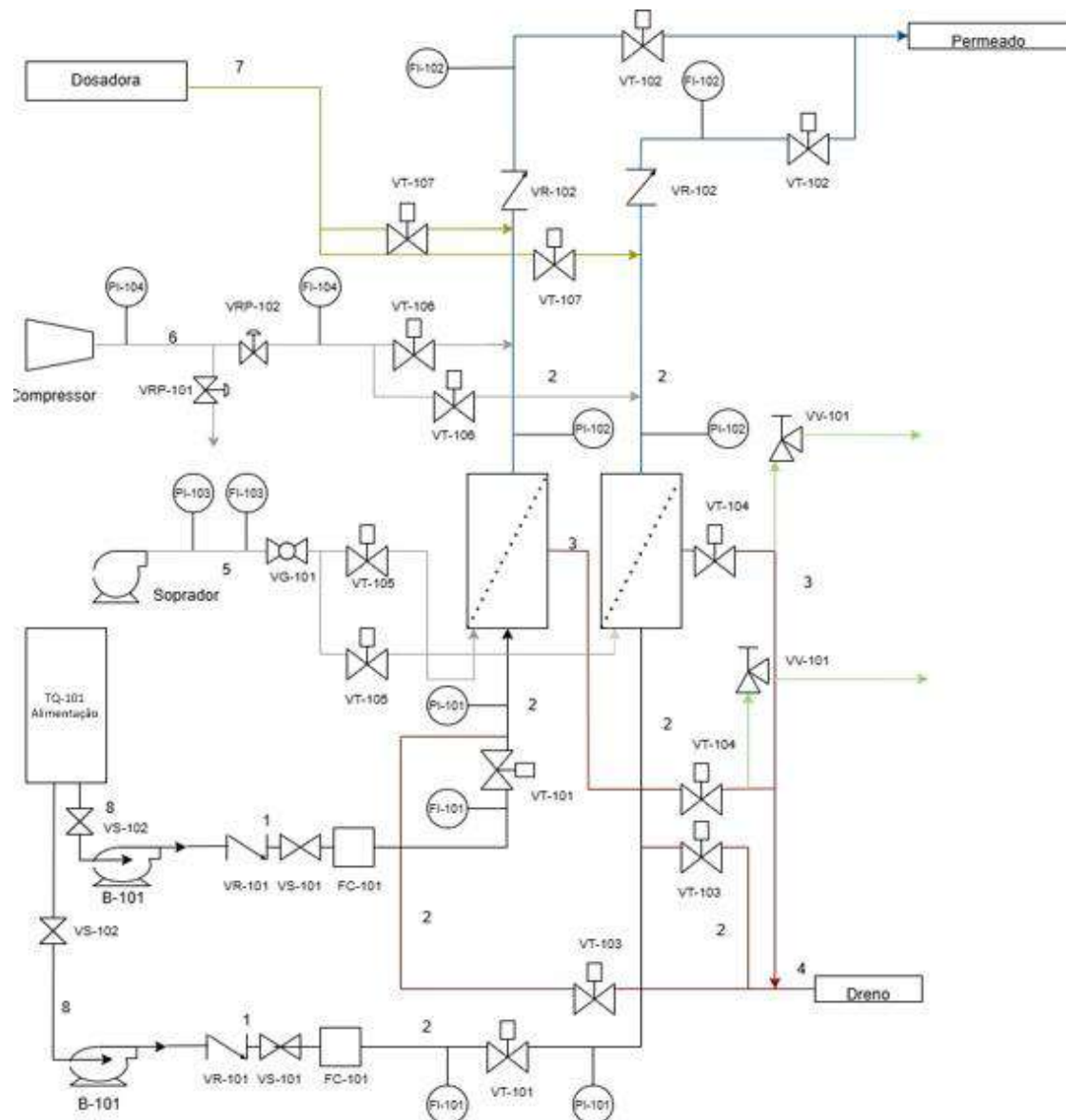


Já o fluxograma da Figura 4.3.7. 2 é selecionado quando há uma bomba de alimentação e mais de um trem.

Figura 4.3.7. 2-Fluxograma: Uma bomba de alimentação e mais de um trem.



Já o fluxograma da Figura 4.3.7. 3 é selecionado quando o número de bombas de alimentação e de trens é maior que um.



4.4 BANCO DE DADOS

O programa possui alguns bancos de dados internos para otimizar o dimensionamento, entre eles o banco de membranas (Figura 4.4. 1). Esse banco é composto por 22 modelos de módulos de ultrafiltração (UF) fornecidos pelas empresas HINADA e PERSALT. Os dados foram coletados a partir dos datasheets disponibilizados pelos fabricantes, conforme apresentado na Tabela 4.4. 1.

Figura 4.4. 1-Banco de Membranas - Parte A e B.

	PMUF-2860		PMUF-2860 MAX		PMUF-2880		PMUF-2880 MAX		PMUF-615A		PMUF-615A MAX		PMUF-620A		PMUF-620A MAX		ULTRAlow40		ULTRAlow MAX 40		ULTRAlow60	
FORNECEDOR	PERSALT		PERSALT		PERSALT		PERSALT		PERSALT		PERSALT		PERSALT		PERSALT		PERSALT		PERSALT		PERSALT	
área (m2)	51		60		77		83		40		45		50		60		55		65		80	
Vazão permeado (m3/h)	2,8		3,3		4,2		4,6		2,2		2,5		2,8		3,3		3		3,6		4,4	
fluxo (L/h.m2)	40		40		40		40		40		40		40		40		40		40		40	
ar (m3/h/modulo)	12		12		12		12		5		5		5		5		15		15		15	
DP membrana (bar)	2,1		2,1		2,1		2,1		1,5		1,5		1,5		1,5		1,5		1,5		1,5	
Max P alimentação (bar)	6,25		6,25		6,25		6,25		3		3		3		3		3		3		3	
Max back wash P (bar)	2,5		2,5		2,5		2,5		-		-		-		-		-		-		-	
Material	PVDF		PVDF		PVDF		PVDF		PVDF		PVDF		PVDF		PVDF		PVDF		PVDF		PVDF	
Turbidez Máx. Ali.	N/A		N/A		N/A		N/A		300		100		300		100		300		100		300	
Temperatura Máxima (°C)	40		40		40		40		45		45		45		45		45		45		45	
Faixa de pH	2 - 11		2 - 11		2 - 11		2 - 11		1 - 12		1 - 12		1 - 12		1 - 12		1 - 12		1 - 12		1 - 12	
Tolerância a Cloro (Instantâneo)	2000		2000		2000		2000		5000ppm		5000ppm		5000ppm		5000ppm		5000ppm		5000ppm		5000ppm	
Exposição Máxima ao Cloro	N/A		N/A		N/A		N/A		1000000 ppm-h		1000000 ppm-h		1000000 ppm-h		1000000 ppm-h		1000000 ppm-h		1000000 ppm-h		1000000 ppm-h	
Diâmetro de poro (micra)	0,04		0,04		0,04		0,04		0,04		0,04		0,04		0,04		0,04		0,04		0,04	
Diâmetro Máximo de Partícula (mm)	0,3		0,3		0,3		0,3		0,5		0,5		0,5		0,5		0,5		0,5		0,5	
Modo de Operação	outside - in		outside - in		outside - in		outside - in		outside - in		outside - in		outside - in		outside - in		outside - in		outside - in		outside - in	
Dimensões (D x C)	225 x 1860		225 x 1860		225 x 2360		225 x 2360		160 x 1730		160 x 1730		160x 2200		160x 2200		250 x 1195		250 x 1195		250 x 1730	
Diâmetro da Fibra (mm)																						

PARTE A

	ULTRAFLOW MAX 60	ULTRAFLOW 80	ULTRAFLOW MAX 80	NMA-UF-200-PVDF	NMA-UF-200-PVC	NMA-UF-250-PVDF	NMA-UF-250-PVC	NMA-UF-250-PES	NMA-UF-90-PVDF	NMA-UF-90-PVC	NMA-UF-90-PES
FORNECEDOR	PERSALT	PERSALT	PERSALT	HINADA	HINADA	HINADA	HINADA	HINADA	HINADA	HINADA	HINADA
área (m²)	106	120	142	38	28	55	48	55	10	4,2	10
Vazão permeado (m³/h)	5,8	6,6	7,8	1,9-5,7							
fluxo (L/h.m²)	40	40	40	40	60						
ar (m³/h/modulo)	15	15	15	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
DP membrana (bar)	1,5	1,5	1,5	2,5	2	2	2	2	2	2	2
Max P alimentação (bar)	3	3	3	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Max back wash P (bar)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Material	PVDF	PVDF	PVDF	PVDF	PVC	PVDF	PVC	PES	PVDF	PVC	PES
Turbidez Mâx. Ali.	100	300	100	200	150	15	15	15	15	15	15
Temperatura Máxima (°C)	45	45	45	45		45			45		
Faixa de pH	1-12	1-12	1-12	2-12	2-12	2-12	2-12	2-12	2-12	2-12	2-12
Tolerância a Cloro (instantâneo)	5000ppm	5000ppm	5000ppm	200ppm	200ppm	200ppm	200ppm	200ppm	200ppm	200ppm	200ppm
Exposição Máxima ao Cloro	1000000 ppm-h	1000000 ppm-h	1000000 ppm-h	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Diâmetro de poro (micra)	0,04	0,04	0,04	0,05	0,01-1	0,01-1	0,01-1	0,01-1	0,01-1	0,01-1	0,01-1
Diâmetro Máximo de Partícula (mm)	0,5	0,5	0,5	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Modo de Operação	outside-in	outside-in	outside-in	outside-in	inside-out	outside-in	inside-out	outside-in	outside-in	inside-out	outside-in
Dimensões [D x C]	250 x 1730	250 x 2230	250 x 2230	200 X 1475	200 X 1475	250 X 1715	250 X 1715	250 X 1715	90 X 1175	90 X 1175	90 X 1175
Diâmetro da Fibra (mm)				0,6	1	0,6	1	0,4	0,6	1	0,4











PARTE B

Tabela 4.4. 1- Dados das membranas.

Características Técnicas da Membrana	Parâmetros Operacionais	Limites Relacionados às Impurezas
Área de filtração	Máxima pressão de alimentação	Turbidez máxima permitida na alimentação
Fluxo de permeado	Máxima pressão de backwash (retrolavagem)	Diâmetro máximo de partícula
Vazão de permeado	Diferença de pressão	Tolerância a cloro (instantânea e máxima exposição)
Vazão de ar por módulo	Faixa de pH operacional	
Material de construção	Temperatura máxima de operação	
Diâmetro do poro		
Dimensões físicas (Incluindo diâmetro da fibra)		
Modo de Operação		











Também foram coletadas as imagens ilustrativas dos módulos das membranas por meio dos fornecedores, conforme a Figura 4.4. 2.

Figura 4.4. 2- Banco de imagens - Parte A, B, C, D e E.

Membranas	Imagens		
PMUF-2860		PMUF-615A MAX	
PMUF-2860 MAX		PMUF-620A	
PMUF-2880		PMUF-620A MAX	
PMUF-2880 MAX		ULTRAFLOW40	
PMUF-615A		ULTRAFLOW MAX 40	

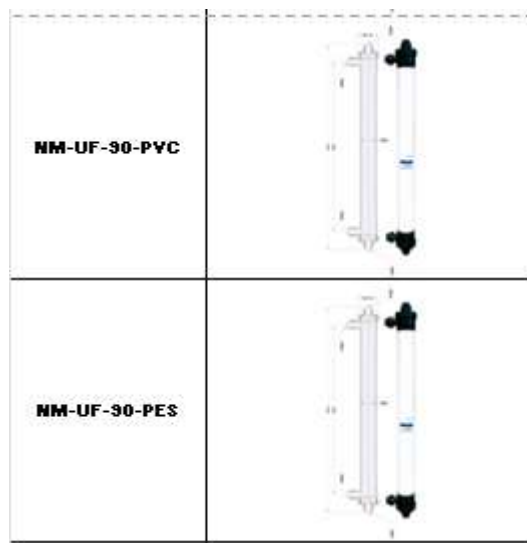
PARTE A

PARTE B

ULTRAFLOW60		NM-UF-200-PYC-	
ULTRAFLOW MAX 60		NM-UF-250-PYDF	
ULTRAFLOW 80		NM-UF-250-PYC	
ULTRAFLOW MAX 80		NM-UF-250-PES	
NM-UF-200-PYDF		NM-UF-30-PYDF	

PARTE C

PARTE D



PARTE E

Outro banco de dados construído (Figura 4.4. 3) foi baseado nas informações do fornecedor de bombas Schneider, com o objetivo de relacionar vazão e diâmetro, definindo assim as dimensões das linhas de líquido. Para isso, foi elaborada uma tabela com intervalos de vazão e seus respectivos diâmetros correspondentes. O programa compara a vazão da linha com os intervalos definidos, utilizando os valores mínimo e máximo, e identifica o intervalo correto, atribuindo o diâmetro correspondente.

Figura 4.4. 3- Banco de dados de vazão e diâmetro para linhas de líquidos.

Recalque			
Vazão Min (m³/h)	Vazão Max (m³/h)	Diâmetro (pol)	Diâmetro (mm)
0,00	0,50	1/2	12,7
0,50	1,50	3/4	25
1,50	3,50	1	32
3,50	6,50	1 1/4	40
6,50	12,00	1 1/2	50
12,00	20,00	2	60
20,00	35,00	2 1/2	75
35,00	50,00	3	85
50,00	100,00	4	110
100,00	200,00	5	140
Sucção			
Vazão Min (m³/h)	Vazão Max (m³/h)	Diâmetro (pol)	Diâmetro (mm)
0,00	0,50	1/2	12,7
0,50	1,50	3/4	25
1,5	3,5	1	32
3,5	6,5	1 1/4	40
6,5	8,5	1 1/2	50
8,5	16	2	60
16	25	2 1/2	75
25	35	3	85
35	65	4	110
65	120	5	140

O mesmo procedimento foi adotado para a linha de ar do soprador, com base nas informações fornecidas pela empresa KAESER, conforme descrito na Figura 4.4. 4 .

Figura 4.4. 4- Banco de dados de vazão e diâmetro para o soprador.

Ar-Soprador			
Vazão Min (m³/h)	Vazão Max (m³/h)	Diâmetro (pol)	Diâmetro (mm)
0,00	195,00	1 1/4	32
195,00	282,00	2	50
282	354	2 1/2	65
354	498	2 1/2	65
498	534	3	80
534	744	3	80
744	942	4	100
942	1338	4	100
1338	1728	6	150
1728	2424	6	150

Para o compressor, foi definido um modelo padrão SCHULZ / BRAVO CSL 10.1/100 ilustrado na Figura 4.4. 5, com vazão de 16,9 Nm³/h e diâmetro de linha de 1/4".

Figura 4.4. 5- Compressor modelo SCHULZ / BRAVO CSL 10.1/100.



Fonte: LOJA DO MECÂNICO,2025.

Outro banco de dados construído foi o de preços de materiais, elaborado com base em diversos fornecedores, por meio de pesquisas na internet e contato direto com as empresas. Os principais fornecedores consultados foram: COMERCIAL LANEL, ASTEN, PROVITEC,

LOJA DO MECÂNICO, MÉRITO COMERCIAL, PRESSGAGE, entre outros. Para cada item, foram adotados os preços médios encontrados. Os valores estão apresentados na Figura 4.4. 6. Os modelos sugeridos para soprador e bombas se encontram-se no ANEXO A.

Figura 4.4. 6-Banco de preços dos materiais – Parte A, B, C e D.

Material	Diâmetro	Preço	Modelo
Bomba alimentação	Sucção2"/desc.1 1/2"	R\$ 4.860,00	Thebe / THS-18
Soprador	1 1/4	R\$ 7.991,64	CRC-4 610 36 TS-5,10CV-TRF-Asten
Compressor	1/4	R\$ 3.150,07	SCHULZ / BRAVO CSL 10.1/100
Bomba limpeza	1 1/2 x1	R\$ 1.400,00	Schneider / BC-92 S 1C
Bomba descarte	1 1/2 x1	R\$ 1.590,90	Schneider / BC-92 T 1C
Bomba Ácido	3/8"x5/8"	R\$ 2.260,00	AWM 5000-MB 5000 / 5900
Bomba NaOH	3/8"x5/8"	R\$ 2.260,00	AWM 5000-MB 5000 / 5900
Bomba NaClO	1/4X1/2"	R\$ 2.260,00	AWM 5000-MB 5000 / 5900
Válvula esfera-inox316	1/2	R\$ 150,00	
	3/4	R\$ 450,00	
	1	R\$ 600,00	
	1 1/4	R\$ 800,00	
	1 1/2	R\$ 1.000,00	
	2	R\$ 1.500,00	
	2 1/2	R\$ 2.200,00	
	3	R\$ 3.000,00	
	4	R\$ 5.000,00	
	5	R\$ 8.000,00	
Válvula fêmea/fêmea com atuador pneumático, solenóide 24v,inox316	1/4	R\$ 1.500,00	
	1/2	R\$ 1.500,00	
	3/4	R\$ 1.800,00	
	1	R\$ 2.200,00	
	1 1/4	R\$ 3.000,00	
	1 1/2	R\$ 3.800,00	
	2	R\$ 5.000,00	
	2 1/2	R\$ 7.000,00	
	3	R\$ 9.000,00	
	4	R\$ 15.000,00	
	5	R\$ 25.000,00	
	6	R\$ 25.000,00	

PARTE A

Material	Diâmetro	Preço	Modelo
Válvula retenção femea/fema inox	1/2	R\$ 200,00	
	3/4	R\$ 250,00	
	1	R\$ 300,00	
	1 1/4	R\$ 400,00	
	1 1/2	R\$ 500,00	
	2	R\$ 700,00	
	2 1/2	R\$ 1.000,00	
	3	R\$ 1.500,00	
	4	R\$ 2.500,00	
	5	R\$ 4.000,00	
Válvula reguladora de pressão femea/fema inox	1/4	R\$ 1.200,00	
	1/2	R\$ 800,00	
	3/4	R\$ 1.200,00	
	1	R\$ 1.500,00	
	1 1/4	R\$ 2.000,00	
	1 1/2	R\$ 2.500,00	
	2	R\$ 3.500,00	
	2 1/2	R\$ 5.000,00	
	3	R\$ 7.000,00	
	4	R\$ 10.000,00	
	5	R\$ 15.000,00	
Válvula Globo femea/femea inox	1/2	R\$ 400,00	
	3/4	R\$ 500,00	
	1	R\$ 600,00	
	1 1/4	R\$ 800,00	
	1 1/2	R\$ 1.000,00	
	2	R\$ 1.500,00	
	2 1/2	R\$ 2.500,00	
	3	R\$ 3.500,00	
	4	R\$ 6.000,00	
	5	R\$ 9.000,00	
	6	R\$ 12.000,00	

PARTE B

Material	Diâmetro	Preço	Modelo
Válvula ventosa femea/femea	1/2	R\$ 300,00	
	3/4	R\$ 400,00	
	1	R\$ 500,00	
	1 1/4	R\$ 700,00	
	1 1/2	R\$ 900,00	
	2	R\$ 1.200,00	
	2 1/2	R\$ 2.000,00	
	3	R\$ 3.000,00	
	4	R\$ 5.000,00	
	5	R\$ 8.000,00	
Transmissor de vazão líquido	1/2	R\$ 57,00	
	3/4	R\$ 164,28	
	1	R\$ 1.069,58	
	1 1/4	R\$ 6.740,00	
	1 1/2	R\$ 2.557,67	
	2	R\$ 9.777,00	
	2 1/2	R\$ 7.592,00	
	3	R\$ 7.136,38	
	4	R\$ 2.465,90	
	5	R\$ 11.182,75	
Transmissor de pressão gás/líquido	1/2	R\$ 1.088,99	
Transmissor temperatura	1/2	R\$ 646,57	
Transmissor de vazão gás	1/4	R\$ 3.000,00	
	1/2	R\$ 10.419,00	
	3/4	R\$ 10.419,00	
	1	R\$ 10.419,00	
	1 1/4	R\$ 10.419,00	
	1 1/2	R\$ 10.419,00	
	2	R\$ 10.419,00	
	2 1/2	R\$ 10.419,00	
	3	R\$ 10.419,00	
	4	R\$ 10.419,00	
	5	R\$ 10.419,00	
	6	R\$ 15.000,00	

PARTE C

	1/2	R\$ 1.500,00	
	3/4	R\$ 1.600,00	
	1	R\$ 1.700,00	
	1 1/4	R\$ 1.850,00	
	1 1/2	R\$ 2.000,00	
	2	R\$ 2.300,00	
	2 1/2	R\$ 2.600,00	
	3	R\$ 3.000,00	
Transmissor de condutividade	4	R\$ 3.500,00	
	5	R\$ 4.200,00	
	1/2	R\$ 30,00	
	3/4	R\$ 134,47	
	1	R\$ 376,20	
	1 1/4	R\$ 376,20	
	1 1/2	R\$ 376,20	
	2	R\$ 376,20	
	2 1/2	R\$ 3.555,00	
	3	R\$ 3.555,00	
	4	R\$ 3.555,00	
Filtro Particulado	5	R\$ 3.555,00	

PARTE D

4.5. RELATÓRIO

A última interface apresenta o relatório final com os dados mais relevantes do projeto, organizados na Tabela 4.5. 1.

Tabela 4.5. 1- Dados de saída do relatório.

Dados do Relatório
Nome do projeto
Empresa
Número do projeto
Afluente
Vazão de permeado
Vazão de permeado instantânea
Número de trens
Módulo
Número de módulos
Área por módulo
Área requerida Fluxo operacional
Fluxo médio corrigido
Número de trens
Concentração dos químicos
Quantidade e vazão das bombas, soprador e compressor
Consumo: Químicos, elétrico, membranas
Mão de obra
Custos operacionais totais
Total de volume produzido
Valor de volume tratado
Custos de materiais

4.6. SIMULAÇÃO

Para a execução da simulação com o programa desenvolvido, foi concebido um projeto de sistema de tratamento de água voltado ao abastecimento da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), localizada no Campus Fundão. Como referência para o estudo, foram utilizados os dados de consumo e despesas com água do campus, extraídos do Plano de Logística Sustentável da UFRJ (2022), abrangendo os anos de 2018, 2019 e 2020.

Devido às distorções provocadas pela pandemia de COVID-19, que afetou de forma significativa os setores comercial e ambiental, optou-se pela utilização dos dados referentes ao ano de 2019, por representarem uma situação mais estável e adequada à análise proposta, além de serem mais recentes do que os dados de 2018.

5 RESULTADOS

5.1. INÍCIO: CARACTERÍSTICAS DO PROJETO

A primeira interface (Figura 5.1. 1) do programa destina-se ao cadastro das informações do projeto, incluindo dados do cliente e características do projeto, que servirão como identificação básica. O botão de “Ajuda” desta interface, exibe as instruções descritas na Figura 5.1. 2.

Figura 5.1. 1- Primeira Interface.

SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO PARA MEMBRANAS DE ULTRAFILTRAÇÃO

Banco Membranas Tempos Químicos Principais Componentes Custo de Operação Custo de Materiais

Dados do Cliente

Nome da Empresa

Email

(DDD) Telefone

(DDD) Celular

CNPJ

Responsável

Dados do Projeto

Nome do Projeto

Número

Localização

Atividade

Vazão de Tratado (m³/h)

PAM
Membranas Seletivas

Avançar

Figura 5.1. 2-Instruções do botão de “Ajuda” da primeira interface.



5.2. SELEÇÃO DE MEMBRANAS

A segunda tela possui o layout apresentado pela Figura 5.2. 1.


Figura 5.2. 1 - Segunda Interface.

Na primeira etapa da interface, o projetista deve iniciar o dimensionamento selecionando a membrana mais adequada ao projeto. Para isso, o programa disponibiliza um banco de dados em uma planilha auxiliar. Quando o usuário seleciona uma membrana na célula

designada com lista suspensa (Figura 5.2. 2), todas as suas especificações técnicas são automaticamente recuperadas da planilha auxiliar e exibidas na segunda interface de acordo com o código da Figura 5.2. 3.

Figura 5.2. 2- Segunda Interface: Seleção de Membranas.

Escolha o módulo abaixo. Após a seleção, clique em "SELECIONAR". Em seguida, preencha todas as células em cinza e clique em "Calcular".

Módulo	ULTRAFLOW 80	SELECIONAR 
Área (m²)	ULTRAFLOW MAX 40 ULTRAFLOW60 ULTRAFLOW MAX 60 ULTRAFLOW 80 ULTRAFLOW MAX 80 NM-UF-200-PVDF NM-UF-200-PVC NM-UF-250-PVDF NM-UF-250-PVC NM-UF-250-PES NM-UF-90-PVDF NM-UF-90-PVC	
Vazão permeado (m³/h)		
Fluxo (L/h.m²)		
Ar (m³/h/módulo)		
DP membrana (bar)		
Max P alimentação (bar)		
Max back wash P (bar)		
Material		
Turbidez máx. Ali.	300	
Temperatura máxima (°C)	45	
Faixa de pH	1 - 12	
Tolerância a cloro (Instantâneo)	5000ppm	
Exposição máxima ao cloro	1000000 ppm-h	
Diâmetro de poro (µm)	0,04	
Diâmetro máximo da partícula(mm)	0,5	
Modo de operação	outside - in	
Dimensões (D x C)	250 x 2230	
Diâmetro da fibra (mm)	-	

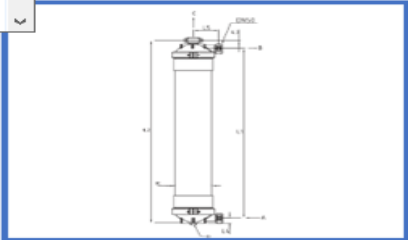


Figura 5.2. 3- Segunda Interface: Código de membranas.

```
' Sub PreencherMembranaEParametrosETracinhos()
Dim planilhaDados As Worksheet
Dim planilhaAtiva As Worksheet
Dim nomeMembrana As String
Dim celulaMembrana As Range
Dim celulaParametro As Range
Dim colunaMembrana As Long
Dim linhaParametro As Long
Dim linhaDestino As Long
Dim celula As Range

' Definir a planilha de dados
Set planilhaDados = ThisWorkbook.Sheets("Banco-Interno-Membranas")

' Definir a planilha ativa
On Error Resume Next
Set planilhaAtiva = ThisWorkbook.Sheets("Banco-Membranas")
On Error GoTo 0

' Verificar se a planilha ativa foi definida corretamente
If planilhaAtiva Is Nothing Then
    MsgBox "Planilha 'Banco-Membranas' não encontrada.", vbExclamation
    Exit Sub
End If

' Obter o nome da membrana da célula F9 na planilha ativa
nomeMembrana = planilhaAtiva.Range("F9").Value

' Se F9 estiver vazio, preenche os parâmetros com "-"
If nomeMembrana = "" Then
    For Each celula In planilhaAtiva.Range("F11:F45")
        If celula.Row Mod 2 = 1 Then 'Alterar F11, F13, F15...
            celula.Value = "-"
            celula.HorizontalAlignment = xlCenter
        End If
    Next celula
    Exit Sub
End If

' Encontrar a membrana na primeira linha da planilha de dados
On Error Resume Next
colunaMembrana = Application.WorksheetFunction.Match(nomeMembrana, planilhaDados.Rows(1), 0)
On Error GoTo 0

' Encontrar a membrana na primeira linha da planilha de dados
On Error Resume Next
colunaMembrana = Application.WorksheetFunction.Match(nomeMembrana, planilhaDados.Rows(1), 0)
On Error GoTo 0

' Se a membrana for encontrada
If colunaMembrana <> 0 Then
    Set celulaMembrana = planilhaDados.Cells(1, colunaMembrana)

    ' Preencher os parâmetros na planilha ativa
    linhaParametro = 3 ' Começar da linha 3 na planilha de dados
    linhaDestino = 11 ' Começar da linha 11 na planilha ativa

    Do While planilhaDados.Cells(linhaParametro, colunaMembrana).Value <> ""
        Set celulaParametro = planilhaDados.Cells(linhaParametro, colunaMembrana)

        ' Preencher os parâmetros na coluna F a partir de F11, pulando uma linha entre cada um
        planilhaAtiva.Cells(linhaDestino, "F").Value = celulaParametro.Value

        ' Atualizar para a próxima linha de destino (F11, F13, F15...)
        linhaDestino = linhaDestino + 2
        linhaParametro = linhaParametro + 1
    Loop
Else
    MsgBox "Membrana não encontrada no banco de dados.", vbExclamation
End If
End Sub
```

Na segunda etapa desta interface (Figura 5.2. 4), o projetista deve informar três parâmetros essenciais: o fluxo operacional desejado, o número de trens e a quantidade de skids necessários.

Figura 5.2. 4-Segunda Interface: Parâmetros.

Fluxo operacional (L/h.m ²)	<input type="text"/>
Módulo	<input type="text"/>
Área/Módulo(m ²)	<input type="text"/>
Área Requerida(m ²)	<input type="text"/>
Vazão de permeado (m ³ /h)	<input type="text"/>
Vazão de permeado Ins. (m ³ /h)	<input type="text"/>
Número de trens	<input type="text"/>
Número de skids	<input type="text"/>
Número de módulos	<input type="text"/>
Número de módulos por trem	<input type="text"/>
Volume morto por módulo (L)	<input type="text"/>
Vazão por trem (m ³ /h)	<input type="text"/>
Volume morto p/trem (L)	<input type="text"/>
Volume morto total (L)	<input type="text"/>
Fluxo médio corrigido(L/h.m ²)	<input type="text"/>

Demanda de Ar	
Vazão de ar p/módulo(Nm ³ /h)	<input type="text"/>
Vazão de ar p/trem (Nm ³ /h)	<input type="text"/>
Vazão de ar total(Nm ³ /h)	<input type="text"/>

Apagar
Calcular

Após o projetista selecionar a membrana e preencher os três parâmetros essenciais. O usuário deverá acionar o botão "Calcular" para que o sistema processe as informações e apresente automaticamente os resultados calculados, descritos na Tabela 4.3.2. 1.

O software também calcula a quantidade de trens recomendada (Figura 5.2. 5), e, com base nesse valor, calcula-se o número de módulos por trem, que pode ser par ou ímpar. Quando o número de módulos por trem é ímpar, os módulos podem ser distribuídos de forma desigual entre os trens, resultando em dois conjuntos distintos. A partir das novas configurações de par ou ímpar, é calculado o fluxo real do sistema. Cabe ao projetista definir a melhor alternativa:

optar por uma configuração com número par ou ímpar de módulos por trem, ou manter as opções previamente definidas pelo usuário.

Figura 5.2. 5-Segunda interface: Recomendações.

Recomendações

Número de trens

Número de módulo por trem:
Número Par.

Número de módulos p/
trem

Número total de módulo

Fluxo real(L/h.m²)

Número de módulo por trem:
Número ímpar

1º Conjunto

Número de módulos p/
trem

Número de trem

2º Conjunto

Número de módulos p/
trem

Número de trem

Total

Número total de módulo

Fluxo real(L/h.m²)

O projetista, posteriormente ao clicar em “Calcular” pode pressionar o botão de “Selecionar” da configuração par ou ímpar, ou manter a configuração previamente calculada, e clicar em “Avançar”. Vale ressaltar, que as recomendações possuem suas limitações, com base nos inputs que o usuário preencher. Se o fluxo operacional for muito elevado, o segundo conjunto sugerido pela configuração ímpar é negativo. Logo, não é apropriado o seu uso.

O botão de ajuda presente na segunda interface, fornece as instruções apresentadas na Figura 5.2. 6.

Figura 5.2. 6-Segunda Interface: Ajuda

Ajuda

1º Passo – Seleção do Módulo:
 Analise as informações de cada módulo e pressione o botão "SELECIONAR " para escolher a membrana.

2º Passo – Preenchimento Obrigatório (células cinza):
 Preencha as células referentes ao fluxo operacional, ao número de trens e ao número de skids. Em seguida, pressione o botão "Calcular".

3º Passo – Recomendações:
 O programa sugerirá duas configurações: número de módulos por trem par e número de módulos por trem ímpar. Se desejar, o projetista pode clicar no botão "Selecionar" para escolher uma das configurações. Em seguida, deve pressionar novamente o botão "Calcular".

5.3. CONFIGURAÇÕES DE TEMPOS

A terceira tela possui o layout apresentado pela
 Figura 5.3. 1.

Figura 5.3. 1- Terceira Interface.

CONFIGURAÇÃO DOS TEMPOS DE OPERAÇÃO

Preencha os formulários abaixo ou deixe os valores já sugeridos nos mesmos.

Filtração

Limpeza de Manutenção

Limpeza de Recuperação

Os valores sugeridos podem ser alterados manualmente.

Etapas	Duração (minuto)	Frequência/ dia ou mês	Duração/ dia ou mês	Volume gasto/trem(m³)	Volume gasto/trem/dia ou mês	Volume gasto total/dia ou mês
Filtração	<input type="text"/>	<input type="text"/> dia	<input type="text"/> min/dia	<input type="text"/>	<input type="text"/> m³/dia	<input type="text"/> m³/dia
Limpeza Física	<input type="text"/>	<input type="text"/> dia	<input type="text"/> min/dia	<input type="text"/>	<input type="text"/> m³/dia	<input type="text"/> m³/dia
1ª Limpeza de Manutenção/NaOH+NaClO	<input type="text"/>	<input type="text"/> dia	<input type="text"/> min/dia	<input type="text"/>	<input type="text"/> m³/dia	<input type="text"/> m³/dia
2ª Limpeza de Manutenção-Ác. Clórico	<input type="text"/>	<input type="text"/> dia	<input type="text"/> min/dia	<input type="text"/>	<input type="text"/> m³/dia	<input type="text"/> m³/dia
1ª Limpeza de Recuperação	<input type="text"/>	<input type="text"/> mês	<input type="text"/> min/mês	<input type="text"/>	<input type="text"/> m³/mês	<input type="text"/> m³/mês
2ª Limpeza de Recuperação	<input type="text"/>	<input type="text"/> mês	<input type="text"/> min/mês	<input type="text"/>	<input type="text"/> m³/mês	<input type="text"/> m³/mês
Teste de Integridade	<input type="text"/>	<input type="text"/> mês	<input type="text"/> min/mês	<input type="text"/>	<input type="text"/> m³/mês	<input type="text"/> m³/mês
TOTAL					<input type="text"/>	<input type="text"/> m³/dia

Anterior

Avançar

A terceira tela tem como objetivo configurar os tempos de operação. Para iniciar o preenchimento, o usuário deve abrir o primeiro formulário, referente à rotina de filtração (Figura 5.3. 2). O volume gasto por trem já é preenchido automaticamente com base nos dados calculados na segunda interface. O projetista pode utilizar os valores de tempo sugeridos pelo programa para cada etapa da rotina, conforme a Tabela 4.3.3. 1, ou inserir valores

personalizados. Após o preenchimento, deve pressionar o botão “Calcular” para determinar o tempo total do ciclo de filtração e, em seguida, “SELECIONAR” e fechar o formulário.

Figura 5.3. 2-Terceira interface: Formulário de filtração.

Etapas	Tempo(minutos)
Filtração	<input type="text"/>
Borbulhamento	<input type="text"/>
Dreno	<input type="text"/>
Enchimento	<input type="text"/>

Total: Ciclo Filtração

Volume gasto/trem m³

O mesmo procedimento deve ser realizado com formulário de Limpeza de Manutenção, conforme a Figura 5.3. 3 e a Tabela 4.3.3. 2.

Figura 5.3. 3-Terceira interface: Formulário da limpeza de manutenção.

Etapas	Tempo (minutos)
Enchimento	<input type="text"/>
Molho	<input type="text"/>
1º Borbulamento	<input type="text"/>
1º Dreno	<input type="text"/>
1º Flush	<input type="text"/>
2º Borbulamento	<input type="text"/>
2º Dreno	<input type="text"/>
2º Flush	<input type="text"/>
Total: Manutenção	<input type="text"/> <input type="button" value="Calcular"/>

Volume gasto/trem m³

O último formulário a ser preenchido refere-se à limpeza de recuperação. O procedimento segue o mesmo padrão dos demais, conforme ilustrado na Figura 5.3. 4 e detalhado na Tabela 4.3.3. 3.

Figura 5.3. 4-Terceira interface: Formulário da limpeza de recuperação.

Etapas	Tempo (minutos)
Enchimento	
1º Molho	
1º Borbulhamento	
2º Molho	
2º Borbulhamento	
1º Dreno	
1º Flush	
3º Borbulhamento	
2º Dreno	
2º Flush	

Total: Recuperação

Volume gasto/trem m³

Após o preenchimento dos formulários, o projetista avança para a segunda etapa de configuração dos tempos, conforme ilustrado na Figura 5.3. 5.

Figura 5.3. 5-Terceira interface: Segunda etapa configurações dos tempos.

Os valores sugeridos podem ser alterados manualmente.

Etapas	Duração (minuto)	Frêquencia/ dia ou mês	Duração/ dia ou mês	Volume gasto/trem(m³)	Volume gasto/trem/dia ou mês	Volume gasto total/dia ou mês
Filtração		dia	min/dia		m³/dia	m³/dia
Limpeza Física		dia	min/dia		m³/dia	m³/dia
1ª Limpeza de Manutenção/NaOH-NaClO		dia	min/dia		m³/dia	m³/dia
2ª Limpeza de Manutenção-Ác. Cítrico		dia	min/dia		m³/dia	m³/dia
1ª Limpeza de Recuperação		mês	min/mês		m³/mês	m³/mês
2ª Limpeza de Recuperação		mês	min/mês		m³/mês	m³/mês
Teste de Integridade		mês	min/mês		m³/mês	m³/mês
TOTAL						m³/dia

A Figura 5.3. 5, apresenta uma tabela com as etapas envolvidas no processo de operação da unidade de UF, além dos dados de saída, que incluem: duração por etapa,

frequência, duração diária ou mensal, volume consumido por trem, volume consumido por trem por dia ou por mês e o volume total consumido diariamente ou mensalmente. A tela permite ao usuário preencher a frequência das limpezas químicas, bem como a frequência e o tempo do teste de integridade. Para esses parâmetros, são disponibilizados valores sugeridos conforme a Tabela 4.3.3. 4. As células em cinza devem ser preenchidas, e, em seguida, o usuário deve pressionar o botão “Calcular” para que o programa gere os dados de saída.

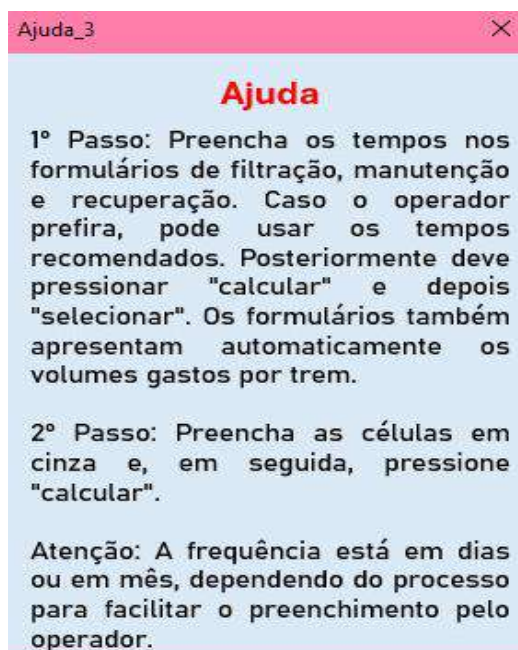
A interface configuração dos tempos, calcula o volume gasto diariamente ou mensalmente de acordo com o código da FIGURA 5.3. 6.

Figura 5.3. 6-Terceira interface: Código do volume gasto diariamente ou mensalmente.

```
Sub VolumeGastoTotalpdiaManutenção1()  
  
    Dim VolumeGastoTotalpdiaManutenção1 As Range  
    Dim Numero_trens As Range  
    Dim FrequenciapDiaManutenção1 As Range  
    Dim VolumeGastopTremManutenção1 As Range  
  
    Dim VolumeGastoTotalManutenção1 As Double  
    Dim resultado As Double  
  
    Set VolumeGastoTotalpdiaManutenção1 = ThisWorkbook.Sheets("Dimensionamento 2").Range("X28")  
    Set FrequenciapDiaManutenção1 = ThisWorkbook.Sheets("Dimensionamento 2").Range("J28")  
    Set VolumeGastopTremManutenção1 = ThisWorkbook.Sheets("Dimensionamento 2").Range("Q28")  
    Set Numero_trens = ThisWorkbook.Sheets("Banco-Membranas").Range("R17")  
  
    ' Calcular o VolumeGastoTotalManutenção1  
    VolumeGastoTotalManutenção1 = VolumeGastopTremManutenção1.Value * Numero_trens.Value  
  
    ' Calcular o resultado final  
    resultado = VolumeGastoTotalManutenção1 * FrequenciapDiaManutenção1.Value  
  
    ' Atribuir o resultado à célula desejada  
    VolumeGastoTotalpdiaManutenção1.Value = resultado  
  
End Sub
```

O botão de ajuda da terceira interface exibe as instruções ilustradas na Figura 5.3. 7.

Figura 5.3. 7-Terceira interface: Ajuda.



5.4. CONSUMO DE PRODUTOS QUÍMICOS

A quarta tela possui o layout apresentado pela Figura 5.4. 1.

Figura 5.4. 1-Quarta interface.

CONSUMO DE QUÍMICOS: MANUTENÇÃO

Inicio **Banco Membranas** **Tempos** **Principais Componentes** **Custo de Operação** **Custo de Materiais**

Manutenção **Recuperação**

Volume de Solução/Trem: m³
 Tempo de Enchimento: minutos
 Vazão de alimentação na limpeza: m³/h

Volume de Solução/Trem: m³
 Tempo de Enchimento: minutos
 Vazão de alimentação na limpeza: m³/h

Opcional
PAC

Preencha as células em cinza com os valores desejados ou sugeridos. Em seguida, clique em "Calcular".

	NaOCl- Hipoclorito de Sódio		NaOH- Hidróxido de Sódio		(C ₆ H ₈ O ₇)-Ácido Cítrico	
	Manutenção	Recuperação	Manutenção	Recuperação	Manutenção	Recuperação
pH	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concentração: Solução Mãe(%)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Densidade da Solução(Kg/L)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concentração: Solu. de Limpeza(mg/L)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Frequência de Limpeza(p/dia)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Vazão: Bomba Dosagem(L/h)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Consumo/Trem/Limpeza(L)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Consumo p/ Dia(L)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Consumo p/ Mês(L)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Massa (Kg/mês)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Na lateral da tela, encontra-se a opção de PAC. Caso o projetista não deseje utilizá-la, deve selecionar “Não” na célula editável. Se desejar utilizá-la, deve selecionar “Sim” e clicar

no botão “PAC”, conforme ilustrado na Figura 5.4. 2. Após pressionar o botão, será exibido um formulário já preenchido com os valores sugeridos para a concentração de íon alumínio (Al^{3+}) desejada, concentração da solução mãe de PAC e densidade. Além da vazão de alimentação da planta e a frequência de dosagem, conforme mostrado na Figura 5.4. 3. Os valores sugeridos podem ser alterados pelo projetista. Posteriormente ao preenchimento o usuário deve pressionar “Calcular” depois “Selecionar”, e por fim fecha o formulário.

Figura 5.4. 2-Quarta interface: Opcional PAC.

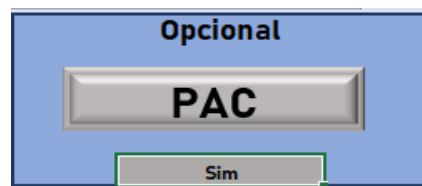
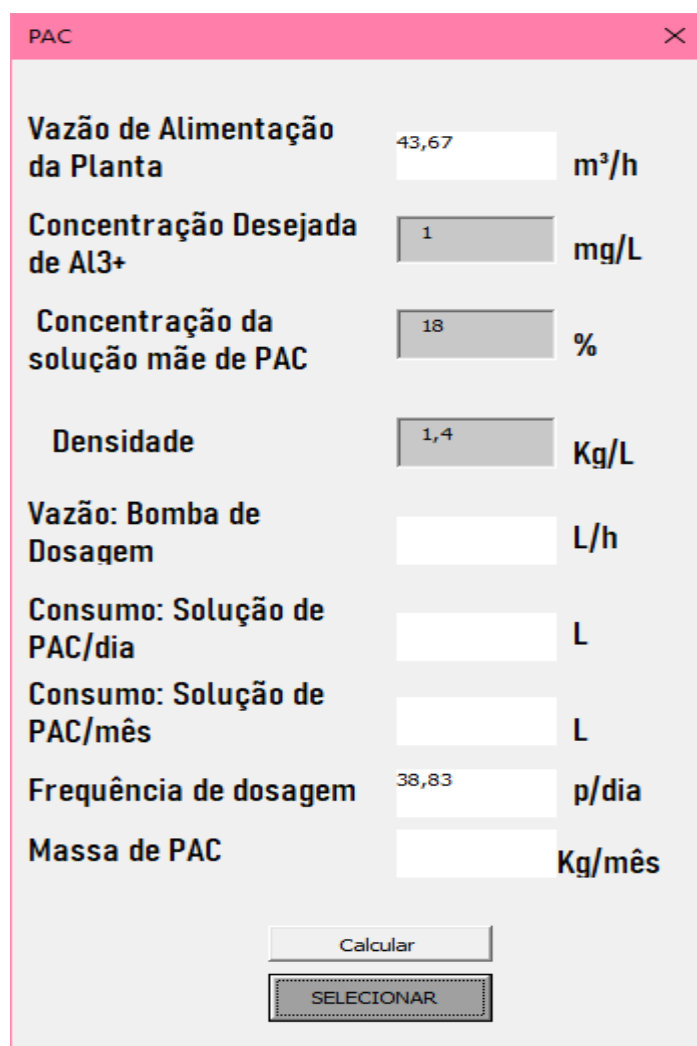


Figura 5.4. 3-Quarta interface: Formulário PAC.

A software window titled "PAC" with a pink header bar and a close button (X) in the top right corner. The main area has a light gray background and contains several input fields with labels to their left and units to their right. The fields are: "Vazão de Alimentação da Planta" with value "43,67" and unit "m³/h"; "Concentração Desejada de Al3+" with value "1" and unit "mg/L"; "Concentração da solução mãe de PAC" with value "18" and unit "%"; "Densidade" with value "1,4" and unit "Kg/L"; "Vazão: Bomba de Dosagem" with an empty field and unit "L/h"; "Consumo: Solução de PAC/dia" with an empty field and unit "L"; "Consumo: Solução de PAC/mês" with an empty field and unit "L"; "Frequência de dosagem" with value "38,83" and unit "p/dia"; and "Massa de PAC" with an empty field and unit "Kg/mês". At the bottom of the window, there are two buttons: "Calcular" and "SELECIONAR".

Na etapa seguinte, devem ser preenchidas as células em cinza, referentes aos parâmetros utilizados no cálculo do consumo de produtos químicos nas limpezas de recuperação e manutenção, de acordo com a Tabela 4.3.4. 1 ou pelos valores desejados pelo projetista. O programa então gera o consumo de químicos conforme apresentado na Figura 5.4. 4, depois que o usuário pressiona em “Calcular”. Os dados de saída são calculados a partir do volume de solução por trem, tempo de enchimento e vazão da alimentação na limpeza, conforme a Figura 5.4. 5.

Figura 5.4. 4-Quarta Interface: Consumo de químicos.

	NaOCl		NaOH		Ácido Cítrico	
	Manutenção	Recuperação	Manutenção	Recuperação	Manutenção	Recuperação
pH			12,00	12,00		
Concentração: Solução Mãe(%)	12,00	12,00	50,00	50,00	2000,00 g/L	2000,00 g/L
Densidade da Solução(Kg/L)	1,18	1,18	1,50	1,50	1,66	1,66
Concentração: Solução de Limpeza(mg)	200,00	1000,00	1439,30		2000,00	2000,00
Frequência de Limpeza(p/dia)	1,00	1,00	1,00	1	0,30	1,00
Vazão: Bomba Dosagem(L/h)	32,84	164,19	46,50	0,00	23,25	4,65
Consumo/Trem/Limpeza(L)	1,03	27,37	1,55	0	0,78	0,78
Consumo p/Dia(L)	2,19	54,73	3,10	0	0,47	0,05
Consumo p/ Mês(L)	65,66	1641,95	92,93	0	13,95	1,54
Massa (Kg/mês)	77,50	1937,50	139,49	0	27,90	3,07
Calcular						

Figura 5.4. 5-Quarta Interface: Volumes de solução/trem, tempo de enchimento e vazão de alimentação.

Manutenção			Recuperação		
Volume de Solução/Trem		m³	Volume de Solução/Trem		m³
Tempo de Enchimento		minutos	Tempo de Enchimento		minutos
Vazão de alimentação na limpeza		m³/h	Vazão de alimentação na limpeza		m³/h

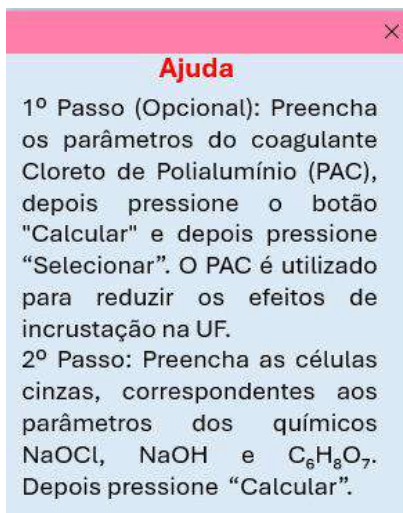
A interface calcula o consumo para cada químico por meio do código apresentado na Figura 5.4. 6.

Figura 5.4. 6-Quarta interface: Código para consumo de massa de químicos.

```
Sub MassaAc()  
  
    Dim MassaAc As Range  
    Dim ConsumoSoluçãoAcpmês As Range  
    Dim ConcentraçãoSoluçãoMãeAc As Range  
  
    Set MassaAc = ThisWorkbook.Sheets("Dimensionamento 3").Range("S33")  
    Set ConsumoSoluçãoAcpmês = ThisWorkbook.Sheets("Dimensionamento 3").Range("S31")  
    Set ConcentraçãoSoluçãoMãeAc = ThisWorkbook.Sheets("Dimensionamento 3").Range("S17")  
  
    ' Calcular e atribuir o resultado  
  
    MassaAc = ConsumoSoluçãoAcpmês * ConcentraçãoSoluçãoMãeAc / 1000  
End Sub
```

O botão “Ajuda” da quarta interface disponibiliza instruções, conforme ilustrado na Figura 5.4. 7.

Figura 5.4. 7-Quarta interface: Ajuda.



5.5. DIMENSIONAMENTO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES

A quinta tela possui o layout apresentado pela Figura 5.5. 1.

Figura 5.5. 1- Quinta Interface.

	Bomba de alimentação	Soprador de ar	Bomba de limpeza	Bomba de descarte	Bomba dosadora (NaOH)	Bomba dosadora (NaClO)	Bomba dosadora (Ác. Cítrico)	Bomba dosadora (PAC)	Compressor de ar
Arranjo	<input type="text"/>								
Qtd em Operação									
Qtd em Reserva									
Vazão Média(m³/h)					L/h	L/h	L/h	L/h	
Vazão por Componente(m³/h)					L/h	L/h	L/h	L/h	
Pressão Média(bar)									
Pressão Máxima(bar)									
Eficiência(%)									
Potência Consumida(Kw)									

A quinta interface apresenta os principais componentes do sistema, que incluem: bomba de alimentação, soprador de ar, bomba de limpeza, bomba de descarte, bombas dosadoras e compressor de ar. O projetista precisa preencher todas as células em cinza para obter os parâmetros calculados, sendo estes a potência, vazões e a quantidade em operação.

O primeiro parâmetro a ser preenchido pelo usuário é o arranjo para cada componente, selecionado por meio de uma lista suspensa com três opções: “Todos os trens”, “Por trem” e “Outra configuração”.

Na primeira opção, o componente é compartilhado entre todos os trens, ou seja, uma única unidade atenderá ao sistema inteiro. Nesse caso, a quantidade em operação (segundo parâmetro) será automaticamente definida como 1.

Na segunda opção, cada trem possui sua própria unidade do componente, resultando em uma quantidade em operação igual ao número total de trens.

Na terceira opção, intitulada 'Outra configuração', o projetista deve inserir manualmente a quantidade de unidades que deseja colocar em operação.

Dessa forma, nas duas primeiras opções do primeiro parâmetro, a quantidade em operação (segundo parâmetro) é calculada automaticamente utilizando o código da Figura 5.5.

2 quando o usuário pressiona em “Calcular”. Já na terceira opção, esse valor deve ser informado manualmente pelo projetista.

Figura 5.5. 2-Código para calcular a quantidade de componente em operação.

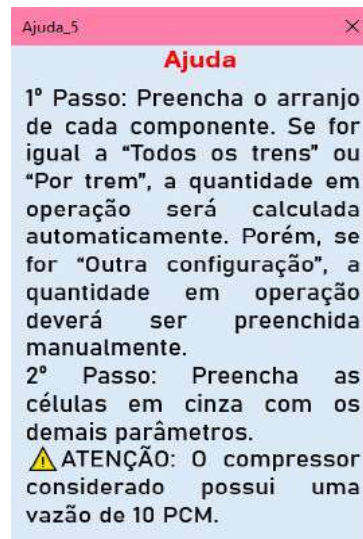
```
'Bomba de Alimentação
```

```
Sub QtdOperacaoAlimentacao()  
    Dim ws As Worksheet  
    Dim wx As Worksheet  
  
    Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Dimensionamento 4")  
    Set wx = ThisWorkbook.Sheets("Banco-Membranas")  
  
    Dim Arranjo As String  
    Arranjo = ws.Range("E13").Value  
  
    Select Case Arranjo  
        Case "Todos os trens"  
            ws.Range("E15").Value = 1  
        Case "Por trem"  
            ws.Range("E15").Value = wx.Range("R17").Value  
        Case "Outra configuração"  
            ' Não faz nada, valor precisa ser inserido manualmente  
        Case Else  
            MsgBox "Arranjo não reconhecido.", vbExclamation  
    End Select  
End Sub
```

Os demais parâmetros, como potência, vazão média e vazão por componente, também são calculados após o preenchimento das células em cinza e o acionamento do botão “Calcular” pelo projetista.

O botão “Ajuda” da quinta interface disponibiliza instruções, conforme ilustrado na Figura 5.5. 3.

Figura 5.5. 3-Quinta interface: Ajuda.



5.6. CUSTO DE OPERAÇÃO

A sexta tela possui o layout apresentado pela Figura 5.6. 1.

Figura 5.6. 1- Sexta Interface

CUSTO DE OPERAÇÃO						Início		Banco Membranas	
Produtos Químicos - Consumo de Limpeza						Tempos		Químicos	
	Manutenção (Kg/mês)	Recuperação (Kg/mês)	Consumo Total (Kg/mês)	Custo unitário R\$/Kg	Custo Total (R\$/mês)	Principais Componentes			
Químico						Custo de Materiais			
NaClO									
NaOH									
Ac. Cítrico									
PAC									
TOTAL									
Energia elétrica						Reposição de Membranas			
	Potência consumida (kW)	Consumo mensal (kWh/mês)	Custo mensal (R\$/mês)			Vida útil (ano)	Custo unitário (R\$)	Custo mensal (R\$/mês)	
Bomba alimentação						Membrana Ultrafiltração			
Soprador de ar									
Bomba de limpeza									
Bomba de descarte									
Bomba dosadora PAC									
Compressor de ar									
Tarifa (kWh)		TOTAL							
Mão de Obra									
		Custo mensal (R\$/mês)	Número de operador			Total (R\$/mês)			
Operador presencial									
Operação Remota									
Preencha as células em cinza com os valores desejados ou sugeridos. Em seguida, clique em "Calcular".									
						Apagar		Calcular	
Custo e produção									
Custos Operacionais Totais (R\$)									
Total de m³ mensal produzido									
Valor de m³ tratado (sem amortização) (R\$)									

A sexta interface calcula os custos operacionais, que incluem: produtos químicos, eletricidade, mão de obra e consumo de membranas. Os custos completos são determinados conforme o código apresentado na Figura 5.6. 2. Os usuários devem preencher os preços dos

produtos químicos, o custo das membranas, a vida útil das membranas e a tarifa de eletricidade, podendo utilizar os valores sugeridos pela ou pelos valores desejados. Após o preenchimento, o projetista deve pressionar o botão “Calcular”, e o programa gera os custos totais de operação.

Figura 5.6. 2- Código do custo de materiais.

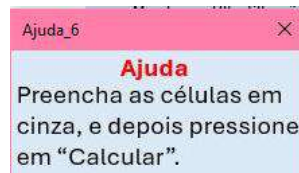
```
Sub CalcularCustosCompleto()
    ' Declaração de variáveis
    Dim wsDim5 As Worksheet, wsBanco As Worksheet
    Dim CustoTotal As Double, MensalProduzido As Double, ValorVolumeTratado As Double
    Dim VazaoPermeado As Double

    ' Definir as planilhas
    On Error Resume Next
    Set wsDim5 = ThisWorkbook.Sheets("Dimensionamento 5")
    Set wsBanco = ThisWorkbook.Sheets("Banco-Membranas")
    On Error GoTo 0

    ' 1. CALCULAR CUSTO TOTAL
    On Error Resume Next
    CustoTotal = wsDim5.Range("W27").Value + wsDim5.Range("W29").Value + _
        wsDim5.Range("W19").Value + wsDim5.Range("Q15").Value + _
        wsDim5.Range("K31").Value
```

O botão “Ajuda” da sexta interface disponibiliza instruções, conforme ilustrado na Figura 5.6. 3.

Figura 5.6. 3-Sexta interface: Ajuda.



5.7. CUSTO DE MATERIAIS E LISTA DE MATERIAIS DETALHADAS

A sétima tela possui o layout apresentado pela Figura 5.7. 1.

Figura 5.7. 1-Sétima Interface.

CUSTO DE MATERIAIS

Parâmetros das Linhas

Linhas	Descrição	Vazão	Diâmetro(pol)
1	Alimentação Geral		
2	Alimentação Sólida/Permeado/Dreno		
3	Dreno do Concentrado		
4	Dreno Total		
5	Soprador		
6	Compressor		
7	Limpeza/Cosadoras		
8	Sucção da Alimentação		
9	NaOCl		
10	NaOH		
11	Ácido Cítrico		
12	Sucção da bomba de descarte		
13	Descarte		

Precificação materiais

Material	Quantidade	Preço total (R\$)
Válvula atuada		
Válvula esfera		
Válvula de retenção		
Válvula Globo		
Válvula reguladora de pressão		
Transmissor de vazão		
Transmissor de condutividade		
Transmissor de temperatura		
Transmissor de pressão		
Bomba de alimentação		
Bomba de limpeza		
Bomba de descarte		
Bomba dosadora		
Soprador		
Compressor		
Filtro de material particulado		
Total		

Início

Banco Membranas

Tempos

Químicos

Principais Componentes

Custo de Operação

Anterior

Relatório

O custo e a quantidade de materiais são apresentados na sétima interface, assim como as vazões e os diâmetros das tubulações. Os valores dos componentes, suas quantidades e diâmetros são copiados da “Lista de Materiais Detalhada” (Figura 5.7. 3), para a qual o usuário pode ser direcionado por meio do botão com essa mesma nomenclatura. O código para essa ação do programa se encontra na Figura 5.7. 2. As vazões, já calculadas nas interfaces anteriores, também são importadas automaticamente.

Figura 5.7. 2- Código para copiar parâmetros para a sétima interface.

```
Sub SomaMateriais()  
Dim wsMateriais As Worksheet  
Dim wsDim6 As Worksheet  
  
Set wsMateriais = Worksheets("Materiais")  
Set wsDim6 = Worksheets("Dimensionamento 6")  
  
' Soma Quantidade  
wsDim6.Range("AA7").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F2:F15")) 'Atuadas  
wsDim6.Range("AA9").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F16:F18")) 'Esferas  
wsDim6.Range("AA11").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F19:F23")) 'Retenção  
wsDim6.Range("AA13").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F27:F29")) 'Globo  
wsDim6.Range("AA15").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F24:F25")) 'Reguladora Pressão  
wsDim6.Range("AA17").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F30:F35")) 'Vazão  
wsDim6.Range("AA19").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F36:F37")) 'Condutividade  
wsDim6.Range("AA21").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F38:F38")) 'Temperatura  
wsDim6.Range("AA23").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F39:F42")) 'Pressão  
wsDim6.Range("AA25").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F43:F43")) 'B-Alimentação  
wsDim6.Range("AA27").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F44:F44")) 'B-Limpeza  
wsDim6.Range("AA29").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F45:F45")) 'B-Descarte  
wsDim6.Range("AA31").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F48:F50")) 'B-Dosadora  
wsDim6.Range("AA33").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F46:F46")) 'Soprador  
wsDim6.Range("AA35").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F47:F47")) 'Compressor  
wsDim6.Range("AA37").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("F51:F51")) 'Filtro  
  
' Soma Preço  
wsDim6.Range("AC7").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H2:H15")) 'Atuadas  
wsDim6.Range("AC9").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H16:H18")) 'Esferas  
wsDim6.Range("AC11").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H19:H23")) 'Retenção  
wsDim6.Range("AC13").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H27:H29")) 'Globo  
wsDim6.Range("AC15").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H24:H25")) 'Reguladora Pressão  
wsDim6.Range("AC17").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H30:H35")) 'Vazão  
wsDim6.Range("AC19").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H36:H37")) 'Condutividade  
wsDim6.Range("AC21").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H38:H38")) 'Temperatura  
wsDim6.Range("AC23").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H39:H42")) 'Pressão  
wsDim6.Range("AC25").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H43:H43")) 'B-Alimentação  
wsDim6.Range("AC27").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H44:H44")) 'B-Limpeza  
wsDim6.Range("AC29").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H45:H45")) 'B-Descarte  
wsDim6.Range("AC31").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H48:H50")) 'B-Dosadora  
wsDim6.Range("AC33").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H46:H46")) 'Soprador  
wsDim6.Range("AC35").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H47:H47")) 'Compressor  
wsDim6.Range("AC37").Value = Application.WorksheetFunction.Sum(wsMateriais.Range("H51:H51")) 'Filtro
```

Figura 5.7. 3- Lista de Materiais Detalhadas - Parte A.

Materiais		Diâmetro	Quantidade	Preço unitário(R\$)	Preço total(R\$)
Bomba Alimentação	B-101			R\$ 4.860,00	R\$ 0,00
Bomba Limpeza	B-102			R\$ 1.400,00	R\$ 0,00
Bomba Descarte	B-103			R\$ 1.590,90	R\$ 0,00
Soprador	SP-101			R\$ 7.991,64	R\$ 0,00
Compressor	CP-101			R\$ 3.150,07	R\$ 0,00
Bomba Dosadora NaOCl	BD-101			R\$ 2.260,00	R\$ 0,00
Bomba Dosadora NaOH	BD-102			R\$ 2.260,00	R\$ 0,00
Bomba Dosadora Ácido	BD-103			R\$ 2.260,00	R\$ 0,00
Filtro					
Material Particulado	FC-101			R\$ 3.555,00	R\$ 0,00
				Total	R\$ 0,00

Se desejar, atualize os preços acima e depois clique em "Atualizar Valores".

Atualizar Valores

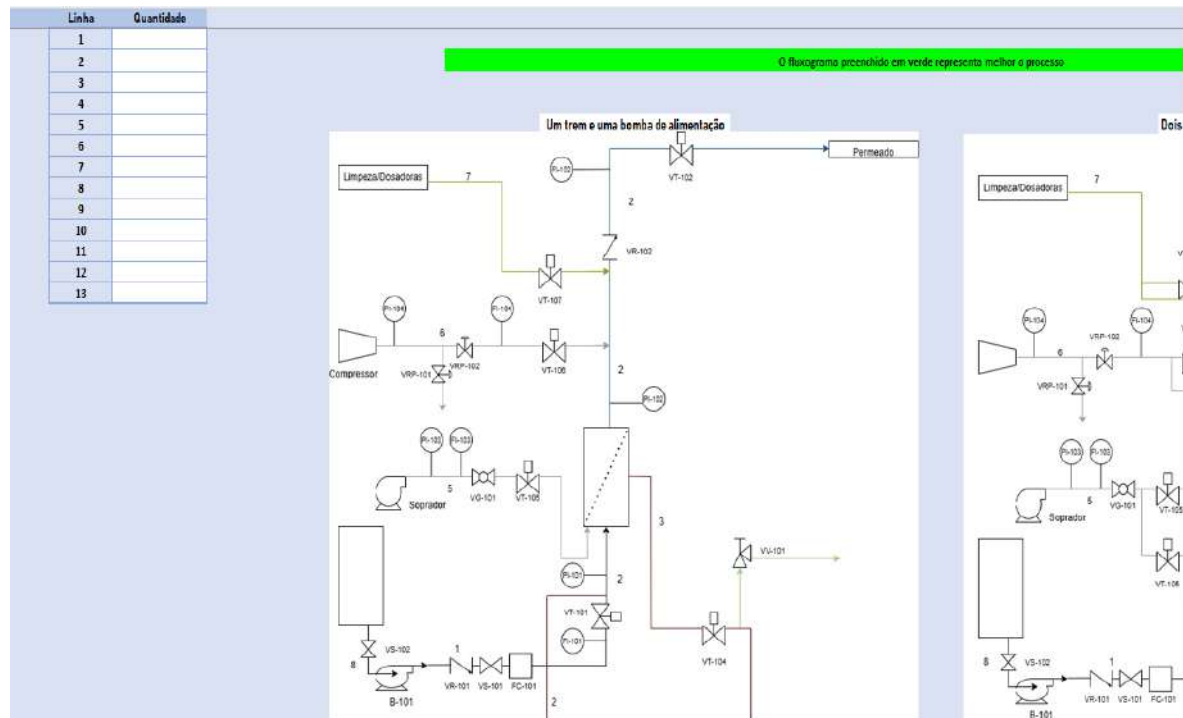
Para atualizar e salvar os preços permanentemente no banco de dados, pressione "Banco de Materiais" e faça as alterações necessárias.

Banco de Materiais

Anterior

Nesta interface “Lista de Materiais Detalhadas” também são apresentadas a quantidade de cada linha, e o fluxograma que melhor representa o processo, como ilustrado na Figura 5.7. 4.

Figura 5.7. 4- Lista de Materiais Detalhadas - Parte B.



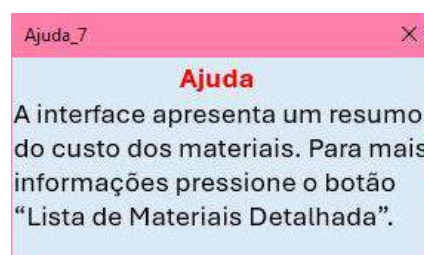
Na mesma interface, o usuário pode clicar no botão “Banco de Materiais” para acessar todos os materiais, as conexões consideradas e os modelos sugeridos, conforme mostrado na Figura 5.7. 5. Os valores podem ser alterados tanto diretamente no banco de dados quanto apenas em um projeto específico, por meio da modificação dos dados na interface “Lista de Materiais Detalhada”.

Figura 5.7. 5- Banco de Materiais.

Material	Diâmetro	Preço	Modelo
Bomba alimentação	Sucção2"/desc.1 1/2"	R\$ 4.860,00	Thebe / THS-18
Soprador	1 1/4	R\$ 7.991,64	CRC-4 610 36 TS-5,10CV-TRF-Asten
Compressor	1/4	R\$ 3.150,07	SCHULZ / BRAVO CSL 10.1/100
Bomba limpeza	1 1/2 x1	R\$ 1.400,00	Schneider / BC-92 S 1C
Bomba descarte	1 1/2 x1	R\$ 1.590,90	Schneider / BC-92 T 1C
Bomba Ácido	3/8"x5/8"	R\$ 2.260,00	AWM 5000-MB 5000 / 5900
Bomba NaOH	3/8"x5/8"	R\$ 2.260,00	AWM 5000-MB 5000 / 5900
Bomba NaClO	1/4X1/2"	R\$ 2.260,00	AWM 5000-MB 5000 / 5900
Válvula esfera-inox316	1/2	R\$ 150,00	
	3/4	R\$ 450,00	
	1	R\$ 600,00	
	1 1/4	R\$ 800,00	
	1 1/2	R\$ 1.000,00	
	2	R\$ 1.500,00	
	2 1/2	R\$ 2.200,00	
	3	R\$ 3.000,00	
	4	R\$ 5.000,00	
	5	R\$ 8.000,00	
Válvula fêmea/fêmea com atuador pneumático, solenóide 3/4"inox316	1/4	R\$ 1.500,00	
	1/2	R\$ 1.500,00	
	3/4	R\$ 1.800,00	
	1	R\$ 2.200,00	
	1 1/4	R\$ 3.000,00	
	1 1/2	R\$ 3.800,00	
	2	R\$ 5.000,00	
	2 1/2	R\$ 7.000,00	
	3	R\$ 9.000,00	
	4	R\$ 15.000,00	
	5	R\$ 25.000,00	
	6	R\$ 35.000,00	

O botão “Ajuda” da sétima interface disponibiliza instruções, conforme ilustrado Figura 5.7. 6.


Figura 5.7. 6- Sétima interface: Ajuda.



5.8. RELATÓRIO

O custo operacional é calculado com base no consumo de produtos químicos, eletricidade, reposição de membranas e mão de obra, sendo dependente dos parâmetros e valores selecionados pelo usuário. Já os custos de materiais são determinados pelas quantidades de itens definidas a partir dos parâmetros operacionais, com os preços atribuídos a partir do banco de dados ou por seleção manual do usuário. Por fim, o programa gera um relatório com os principais dados, conforme apresentado na Figura 5.8. 1 e conforme a . O relatório pode ser impresso com um simples clique no botão “Imprimir”.

Figura 5.8. 1- Relatório final.

	PROJETO:					Água para o Fundão					
	EMPRESA:		UFRJ								
	NÚMERO:		139								
DADOS DO PROJETO											
Afluente						Águas Superficiais					
Vazão de Permeado						74,51			m³/h		
Vazão de Permeado Instantânea						81,35			m³/h		
Número de Trens						2					
Módulo		ULTRAFLOW 80				NºMódulo			18		
Área/Módulo		120		m²		Área Requerida		2034		m²	
Fluxo Operacional						40,00			L/h.m²		
Fluxo Médio Corrigido						37,51			L/h.m²		
Número de Trens						2					
Concentração:Hipoclorito de Sódio (NaOCl)											
Manutenção						200,00			mg/L		
Recuperação						1000,00			mg/L		
Concentração:Hidróxido de Sódio (NaOH)											
Manutenção						1486,03			mg/L		
Recuperação						3483,59			mg/L		
Concentração: Ácido Cítrico(C₆H₈O₇)											
Manutenção						2000,00			mg/L		
Recuperação						2000,00			mg/L		
Concentração: PAC						0			%		
Bomba Alimentação	Qtd	2	Vazão	40,67	m³/h	Soprador	Qtd	1	Vazão	270,00	m³/h
Bomba Limpeza	Qtd	1	Vazão	13,30	m³/h	Bomba Descarga	Qtd	1	Vazão	12,72	m³/h
Bomba NaOH	Qtd	1	Vazão	26,35	L/h	Bomba NaClO	Qtd	1	Vazão	18,79	L/h
Bomba Ác. Cítrico	Qtd	1	Vazão	13,30	L/h	PAC	Qtd	1	Vazão	0,00	L/h
Compressor				Qtd	1	Vazão		16,90		m³/h	
Custo de Consumo de Químicos						R\$ 1.812,90			mês		
Custo de Energia Elétrica						R\$ 3.789,93			mês		
Custo de Membranas						R\$ 17.025,00			mês		
Custo de mão de Obra						R\$ 14.000,00			mês		
Custos Operacionais Totais						R\$ 36.627,82					
Total de m³ produzido						53647,2			m³/mês		
Valor de m³ tratado(sem amortização)						R\$ 0,68					
Custos de Materiaias						R\$ 294.241,64					

5.9. SIMULAÇÃO: ÁGUA PARA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Para realizar a simulação com o programa desenvolvido, foi idealizado um projeto de tratamento de água destinado ao abastecimento da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Campus Fundão. Como base para o estudo, é utilizado os dados de consumo e gasto de água do campus do Fundão, extraídos do Plano de Logística Sustentável da UFRJ (2022), que contempla os anos de 2018, 2019 e 2020.

Em razão das distorções causadas pela pandemia de COVID-19, que impactou significativamente os setores comercial e ambiental, optou-se por os dados referentes ao ano de 2019, por representarem um cenário mais estável e adequado à análise proposta, além de ser mais recente que 2018.

O consumo de água no ano de 2019 foi de 643.800 m³, por meio deste dado foi estimado a vazão de permeado desejada por meio da Equação 5.9.1.

$$V_p = \frac{\text{Volume total}}{\text{Numero de meses} \cdot 30.24} = \frac{643.800}{12 \cdot 30.34} = 74,51 \text{ m}^3/\text{h} \quad (5.9.1)$$

Vale ressaltar que esta vazão está sendo apenas estimada, uma vez que o consumo de água varia ao longo do dia. Durante o horário comercial, observa-se um maior consumo, enquanto fora desse período e nos finais de semana, o consumo tende a ser reduzido. No entanto, para fins de cálculo, adotou-se a aproximação de um consumo uniforme de água.

Para iniciar a simulação, foram inseridas as informações da UFRJ para a identificação do programa, bem como a vazão de permeado desejada, conforme demonstrado na Figura 5.9. 1.

Figura 5.9. 1-Simulação: Primeira interface.

SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO PARA MEMBRANAS DE ULTRAFILTRAÇÃO

Banco Membranas Tempos Químicos Principais Componentes Custo de Operação Custo de Materiais

Dados do Cliente

Nome da Empresa: UFRJ
Email: comunicacao@pu.ufrj.br
(DDD) Telefone: (21) 3938-0346
(DDD) Celular: 21 99871-1621
CNPJ: -
Responsável: -

Dados do Projeto

Nome do Projeto: Água para o Fundão
Número: 139
Localização: Rio de Janeiro
Afluente: Águas Superficiais
Vazão de Tratado (m³/h)*: 74,5

PAM Membranas Seletivas

Avançar

Para a segunda interface, foram selecionados os seguintes parâmetros de entrada:

- Módulo: O modelo ULTRAflow, da Persalt, foi selecionado devido ao alto fluxo e à menor necessidade de manutenção, tecnologia proporcionada pelo fornecedor.
- Fluxo: 40 L/(h·m²) (valor baseado no banco de dados da membrana)
- Número de trens: 2
- Skids: 1

Após a inserção dos dados acima, o botão "Calcular" foi acionado, gerando os resultados de saída apresentados na Figura 5.9. 2.

Figura 5.9. 2- Simulação: Segunda interface - Parte A.

		Recomendações	
Fluxo operacional (L/h.m²)	40	Número de trens	2
Módulo	ULTRAflow 80	Número de módulo por trem: Número Par.	
Área/Módulo(m²)	120	Selecionar	
Área Requerida(m²)	2033,63	Número de módulos p/ trem	9
Vazão de permeado (m³/h)	74,51	Número total de módulo	18
Vazão de permeado Ins. (m³/h)	81,35	Fluxo real(L/h.m²)	37,51
Númeto de trens	2	Número de módulo por trem: Número Ímpar	
Número de skids	1	1º Conjunto	
Número de módulos	17	Número de módulos p/ trem	8
Número de módulos por trem	8,5	Número de trem	1
Volume morto por módulo (L)	49,26	2º Conjunto	
Vazão por trem (m³/h)	37,255	Número de módulos p/ trem	8
Volume morto p/trem (L)	418,70	Número de trem	1
Volume morto total (L)	837,41	Total	Selecionar
Fluxo médio corrigido(L/h.m²)	36,64	Número total de módulo	16
Demanda de Ar		Fluxo real(L/h.m²)	42,24
Vazão de ar p/módulo(Nm³/h)	15		
Vazão de ar p/trem (Nm³/h)	127,5		
Vazão de ar total(Nm³/h)	255		
Apagar		Calcular	

Optou-se por seguir a recomendação do programa de configuração PAR. Dessa forma, pressionou-se o botão “Selecionar”, gerando os novos dados apresentados na Figura 5.9. 3.

Figura 5.9. 3- Simulação: Segunda interface - Parte B.

		Recomendações	
Fluxo operacional (L/h.m ²)	40	Número de trens	2
Módulo	ULTRAflow 80	Número de módulo por trem: Número Par.	
Área/Módulo(m ²)	120	Selecionar	
Área Requerida(m ²)	2033,63		
Vazão de permeado (m ³ /h)	74,51	Número de módulos p/ trem	9
Vazão de permeado Ins. (m ³ /h)	81,35	Número total de módulo	18
Númeto de trens	2	Fluxo real(L/h.m ²)	37,51
Número de skids	1	Número de módulo por trem: Número Ímpar	
Número de módulos	18	1º Conjunto	
Número de módulos por trem	9	Número de módulos p/ trem	
Volume morto por módulo (L)	49,26	8	
Vazão por trem (m ³ /h)	37,255	Número de trem	
Volume morto p/trem (L)	443,33	1	
Volume morto total (L)	886,67	2º Conjunto	
Fluxo médio corrigido(L/h.m ²)	37,51	Número de módulos p/ trem	
Demanda de Ar Vazão de ar p/módulo(Nm ³ /h) 15 Vazão de ar p/trem (Nm ³ /h) 135 Vazão de ar total(Nm ³ /h) 270		8	
		Número de trem	
		1	
		Total	Selecionar
Apagar		Calcular	Número total de módulo
		16	
		Fluxo real(L/h.m ²)	42,24

Na terceira interface de configurações dos tempos, todos os valores de entrada utilizados foram os sugeridos pelo programa, resultando no volume gasto total de 37,10 m³/dia apresentado na Figura 5.9. 4.

Figura 5.9. 4- Simulação: Terceira interface.

Etapas	Duração (minuto)	Frequência/ dia ou mês	Duração/ dia ou mês	Volume gasto/trem(m³)	Volume gasto/trem/dia ou mês	Volume gasto total/dia ou mês
Filtração	40	38,83 dia	1553,18 min/dia	0,00	0,00 m³/dia	0,00 m³/dia
Limpeza Física	2,83	38,83 dia	109,89 min/dia	0,44	17,08 m³/dia	34,17 m³/dia
1ª Limpeza de Manutenção/NaOH+NaClO	21,33	1	21,33 min/dia	1,06	1,06 m³/dia	2,12 m³/dia
2ª Limpeza de Manutenção-Ác. Cítrico	21,33	0,3 dia	6,40 min/dia	1,06	0,32 m³/dia	0,64 m³/dia
1ª Limpeza de Recuperação	114	1 mês	114,00 min/mês	1,06	1,06 m³/mês	2,12 m³/mês
2ª Limpeza de Recuperação	114	1 mês	114,00 min/mês	1,06	1,06 m³/mês	2,12 m³/mês
Teste de Integridade	10	1 mês	10,00 min/mês	0,44	0,44 m³/mês	0,89 m³/mês
TOTAL					37,10	37,10 m³/dia

Na quarta interface, referente ao consumo de químicos, optou-se por não utilizar PAC, para redução do custo operacional. Os dados de entrada foram os sugeridos pelo programa, gerando os dados de saída apresentados na Figura 5.9. 5.

Figura 5.9. 5- Simulação: Quarta interface.

	NaOCl- Hipoclorito de Sódio		NaOH- Hidróxido de Sódio		(C ₆ H ₅ O ₇)-Ácido Cítrico	
	Manutenção	Recuperação	Manutenção	Recuperação	Manutenção	Recuperação
pH						
Concentração: Solução Máx(%)	12,00	12,00	12,57	12,94	2000,00	2000,00
Densidade da Solução(Kg/L)	1,18	1,18	1,50	1,50	1,66	1,66
Concentração: Solu. de Limpeza(mg/L)	200,00	1000,00	1486,03	3483,59	2000,00	2000,00
Frequência de Limpeza(p/dia)	1,00	0,03	1,00	0,03	0,30	0,03
Vazão: Bomba Dosagem(L/h)	18,79	18,79	26,35	12,36	13,30	2,66
Consumo/Trem/Limpeza(L)	0,63	3,13	0,88	2,06	0,44	0,44
Consumo p/ Dia(L)	1,25	0,21	1,76	0,14	0,27	0,03
Consumo p/ Mês(L)	37,57	6,26	52,70	4,12	7,98	0,89
Massa (Kg/mês)	44,33	7,39	79,06	6,18	15,96	1,77
						<div>Apagar</div> <div>Calcular</div>

Na quinta interface, referente aos principais componentes, o arranjo de todos foi definido como “Todos os trens” para redução dos custos de investimento e operacional, exceto para a bomba de alimentação, que foi selecionada como “Por trem”, pois caso tenha um problema operacional em uma das linhas a planta não pare de funcionar. Os demais dados utilizados foram os sugeridos pelo programa. Ao pressionar “Calcular” os dados de saída foram gerados conforme a Figura 5.9. 6.

Figura 5.9. 6- Simulação: Quinta interface.

	Bomba de alimentação	Soprador de ar	Bomba de limpeza	Bomba de descarte	Bomba dosadora (NaOH)	Bomba dosadora (NaClO)	Bomba dosadora (Ác Clórico)	Bomba dosadora (PAC)	Compressor de ar
Arranjo	Por trem	Todos os trens	Todos os trens	Todos os trens	Todos os trens	Todos os trens	Todos os trens	Todos os trens	Todos os trens
Qtd em Operação	2	1	1	1	1	1	1	1	1
Qtd em Reserva	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Vazão Média(m³/h)	81,35	270,00	13,30	12,72	26,35 L/h	18,79 L/h	13,30 L/h	0,00 L/h	16,90
Vazão por Componentes(m³/h)	40,67	270,00	13,30	12,72	26,35 L/h	18,79 L/h	13,30 L/h	0,00 L/h	16,90
Pressão Média(bar)	1,00	0,40	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50	5,00	4,00
Pressão Máxima(bar)	3,00	0,70	3,00	3,00	2,00	2,00	2,00	5,00	4,00
Eficiência(0-1)	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Potência Consumida(Kw)	2,95	3,91	0,48	0,46	0,00048	0,00034	0,00024	0,00000	2,45

A sexta interface, referente ao custo operacional, foi calculada com base nos valores sugeridos pelo programa. O custo com químicos está apresentado na Figura 5.9. 7; o custo com energia elétrica, na Figura 5.9. 8; e o custo com reposição de membranas e mão de obra, na Figura 5.9. 9. A Figura 5.9. 10 apresenta os custos totais e a produção mensal do sistema.

Figura 5.9. 7-Simulação: Sexta interface-Custos químicos.

Químicos	Manutenção (Kg/mês)	Recuperação (Kg/mês)	Consumo Total (Kg/mês)	Custo unitário R\$/Kg	Custo Total (R\$/mês)
NaClO	44,33	7,39	51,72	10,00	R\$ 517,22
NaOH	79,06	6,18	85,23	10,00	R\$ 852,34
Ac. Cítrico	15,96	1,77	17,73	25,00	R\$ 443,33
PAC			0	30,00	R\$ 0,00
TOTAL					R\$ 1.812,90

Figura 5.9. 8-Simulação: Sexta interface-Custos de energia elétrica.

Energia elétrica			
	Potência consumida(kW)	Consumo mensal(kWh/mês)	Custo mensal(R\$/mês)
Bomba alimentação	2,95	2316,21	R\$ 3.474,31
Soprador de ar	3,91	135,53	R\$ 203,29
Bomba de limpeza	0,48	0,79	R\$ 1,18
Bomba de descarte	0,46	0,66	R\$ 0,99
Bomba dosadora: PAC	0,00000	0,00	R\$ 0,00
Compressor de ar	2,45	73,44	R\$ 110,16
Tarifa(kWh)	1,50	TOTAL	R\$ 3.789,93

Figura 5.9. 9-Simulação: Sexta interface-Custos de membranas e mão de obra.

Reposição de Membranas			
	Vida útil (ano)	Custo unitário(R\$)	Custo mensal (R\$/mês)
Membrana Ultrafiltração	2,00	R\$ 22.700,00	R\$ 17.025,00
Mão de Obra			
	Custo mensal(R\$/mês)	Número de operador	Total (R\$/mês)
Operador presencial	R\$ 6.000,00	2,00	R\$ 12.000,00
Operação Remota	R\$ 2.000,00	1,00	R\$ 2.000,00

Figura 5.9. 10-Simulação: Sexta interface-Custos operacionais totais e produção mensal.

Custo e produção	
Custos Operacionais Totais(R\$)	R\$ 36.627,82
Total de m³ mensal produzido	53.647,20 m³
Valor de m³ tratado(sem amortização)(R\$)	R\$ 0,68

Por fim, o programa gera a lista de materiais, apresentada na Figura 5.9. 11, e o relatório final da simulação, mostrado na Figura 5.9. 12.

Figura 5.9. 11-Simulação: Sexta interface-Custo de materiais.

Parâmetros das linhas

Linhas

Descrição

Vazão (m³/h)

Diâmetro (pol)

1

Alimentação Geral

74,51

3

2

Alimentação (item)/Permeado/Dreno Aliment.

37,26

3

3

Dreno do Concentrado

37,26

3

4

Dreno Total

74,51

4

5

Soprador

270,00

2

6

Compressor

16,90

1/4

7

Limpeza/Dosadoras

13,30

2

8

Sucção da Alimentação

74,51

5

9

NaOCl

0,02

1/2

10

NaOH

0,03

1/2

11

Ácido Cítrico

0,013

1/2

12

Sucção da bomba de descarte

74,51

5

13

Descarte

74,51

4

Preificação materiais

Material

Quantidade

Preço total (R\$)

Válvula atuada

21

R\$ 132.500,00

Válvula esfera

5

R\$ 30.000,00

Válvula de retenção

7

R\$ 4.600,00

Válvula Globo

3

R\$ 4.500,00

Válvula reguladora de pressão

2

R\$ 2.400,00

Transmissor de vazão

8

R\$ 61.518,52

Transmissor de condutividade

2

R\$ 5.800,00

Transmissor de temperatura

1

R\$ 646,57

Transmissor de pressão

6

R\$ 4.533,94

Bomba de alimentação

2

R\$ 9.720,00

Bomba de limpeza

1

R\$ 1.400,00

Bomba de descarte

1

R\$ 1.590,90

Bomba dosadora

3

R\$ 4.780,00

Soprador

1

R\$ 7.991,64

Compressor

1

R\$ 3.150,07

Filtro de material particulado

2

R\$ 7.110,00

Total

R\$ 294.241,64

Resetar


Apagar

Lista de Materiais Detalhada

Anterior

Relatório

Figura 5.9. 12-Simulação: Sexta interface-Relatório final.

	PROJETO:					Água para o Fundão					
	EMPRESA:		UFRJ								
	NÚMERO:		139								
DADOS DO PROJETO											
Afluente						Águas Superficiais					
Vazão de Permeado						74,51			m³/h		
Vazão de Permeado Instantânea						81,35			m³/h		
Número de Trens						2					
Módulo		ULTRAFLOW 80				NºMódulo			18		
Área/Módulo		120		m²		Área Requerida		2034		m²	
Fluxo Operacional						40,00			L/h.m²		
Fluxo Médio Corrigido						37,51			L/h.m²		
Número de Trens						2					
Concentração:Hipoclorito de Sódio (NaOCl)											
Manutenção						200,00			mg/L		
Recuperação						1000,00			mg/L		
Concentração:Hidróxido de Sódio (NaOH)											
Manutenção						1486,03			mg/L		
Recuperação						3483,59			mg/L		
Concentração: Ácido Cítrico(C ₆ H ₈ O ₇)											
Manutenção						2000,00			mg/L		
Recuperação						2000,00			mg/L		
Concentração: PAC						0			%		
Bomba Alimentação	Qtd	2	Vazão	40,67	m³/h	Soprador	Qtd	1	Vazão	270,00	m³/h
Bomba Limpeza	Qtd	1	Vazão	13,30	m³/h	Bomba Descarga	Qtd	1	Vazão	12,72	m³/h
Bomba NaOH	Qtd	1	Vazão	26,35	L/h	Bomba NaClO	Qtd	1	Vazão	18,79	L/h
Bomba Ác. Cítrico	Qtd	1	Vazão	13,30	L/h	PAC	Qtd	1	Vazão	0,00	L/h
Compressor				Qtd	1	Vazão		16,90		m³/h	
Custo de Consumo de Químicos						R\$ 1.812,90			mês		
Custo de Energia Elétrica						R\$ 3.789,93			mês		
Custo de Membranas						R\$ 17.025,00			mês		
Custo de mão de Obra						R\$ 14.000,00			mês		
Custos Operacionais Totais						R\$ 36.627,82					
Total de m³ produzido						53647,2			m³/mês		
Valor de m³ tratado(sem amortização)						R\$ 0,68					
Custos de Materiais						R\$ 294.241,64					

Analisando o custo operacional mensal da planta, de R\$ 36.627,82, e estimando o valor anual por meio da Equação 5.9.2, pode-se compará-lo ao custo anual de água em 2019 pela UFRJ campus Fundão.

$$Custo\ anual\ de\ agua\ por\ processo\ de\ UF = 36.627,82.12 = R\$439.533,84 \quad (5.9.2)$$

Antes de realizar a comparação entre os custos, é importante considerar que os dados analisados pertencem a anos diferentes, estando, portanto, inseridos em contextos econômicos distintos. Para uma análise mais coerente, o custo da água consumida pela Cidade Universitária em 2019 foi estimado utilizando a tarifa atual, fornecida pela Águas do Rio (2025), conforme

a Equação 5.9.3. Para obter a tarifa para UFRJ, foi considerada que a mesma se encontra na Área A (Rio de Janeiro) e sua categoria é a Pública, sendo assim segundo a Águas do Rio (2025) sua tarifa é de 19,784217 R\$/m³.

$$\text{Custo de agua pelo processo convencional} = \text{Tarifa} \cdot \text{consumo em 2019} \quad (5.9.3)$$

$$\text{Custo de agua pelo processo convencional} = 19,784217 \cdot 643.800 = \text{R\$}12.737.078,9046$$

Comparando o custo anual do processo de UF (R\$ 439.533,84) com o do processo convencional (R\$ 12.737.078,90), observa-se que o sistema por membranas representa apenas 3,45% do custo estimado com a tarifa atual do processo convencional. Isso demonstra as vantagens da ultrafiltração, que, além de produzir água de boa qualidade, também se mostra economicamente viável.

Além disso, para incorporar o custo de investimento à análise, é necessário considerar, além dos materiais, outros fatores como impostos, contingência, custo de mão de obra (homem-hora), entre outros. Para o processo em questão, o custo com materiais foi estimado em R\$ 294.241,64. Com o auxílio da empresa Pam Membranas, adotou-se a premissa de que esse valor corresponde a 45% do investimento total. Com base nessa proporção, foi calculado o custo total de investimento do projeto, conforme apresentado na Equação 5.9.3.

$$\text{Investimento total} = 294.241,64 \cdot \frac{100}{45} = \text{R\$}653.870,31 \quad (5.9.1)$$

Somando o custo operacional anual com o investimento inicial para a implantação da planta de UF, o valor total no primeiro ano de operação é de R\$ 1.093.404,15, representando apenas 8,6% do custo do processo convencional. Sendo assim, mesmo considerando o investimento para a construção da planta de UF no primeiro ano de operação, a diferença de custos entre os dois processos permanece significativa, tornando o sistema por membranas uma alternativa de grande interesse sob as perspectivas financeira e ambiental.

6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho resultou em um aplicativo capaz de realizar o dimensionamento de sistemas de tratamento de água superficial por meio do processo de ultrafiltração (UF), utilizando a linguagem VBA integrada ao Excel. A ferramenta foi concebida com o objetivo de facilitar o trabalho dos projetistas, reunindo todas as etapas do dimensionamento em interfaces interativas, de fácil uso e com lógica sequencial.

O layout do aplicativo foi desenvolvido com base na colaboração de profissionais experientes da área, garantindo que cada funcionalidade e elemento visual esteja alinhado com as demandas práticas dos projetos reais. Essa construção colaborativa permitiu a criação de uma interface mais intuitiva, que facilita a navegação. Ao incorporar sugestões e feedbacks vindos diretamente de quem atua diariamente com projetos, o sistema se torna não apenas mais eficiente, mas também mais adaptado às necessidades e rotinas dos engenheiros e projetistas, promovendo maior agilidade e precisão nas etapas de trabalho.

O programa automatiza e organiza os cálculos que, manualmente, demandariam mais tempo por parte dos engenheiros, reduzindo significativamente o consumo de homem-hora. As sugestões de parâmetros operacionais fornecidas pela Pam Membranas e por seus fornecedores também contribuíram para a otimização do tempo e oferecem suporte técnico na utilização do programa.

Além disso, os bancos de dados integrados ao sistema facilitam o processo de dimensionamento, uma vez que reduzem a necessidade de pesquisas por parte do projetista. O banco de dados de membranas, por exemplo, possibilita o uso de módulos variados e de diferentes marcas. Já os bancos de dados com informações de vazão, diâmetro de tubulação e preços de materiais permitem uma análise mais eficiente do investimento necessário para o projeto.

No entanto, o aplicativo também apresenta algumas limitações. Para que o sistema seja utilizado de forma eficaz, é fundamental que o projetista possua, ao menos, conhecimentos técnicos básicos, a fim de realizar um dimensionamento preciso e adequado às exigências do projeto. O programa oferece suporte e facilita o processo, mas não substitui o olhar crítico e a expertise profissional.

Além disso, é necessário realizar atualizações periódicas no banco de dados do sistema, especialmente em relação aos valores de materiais e equipamentos, para que os orçamentos gerados reflitam com precisão os custos atualizados do mercado. A manutenção desses dados é essencial para garantir que as análises de investimento e as

tomadas de decisão continuem sendo confiáveis e economicamente viáveis ao longo do tempo.

A simulação realizada para avaliar a execução do projeto teve como objetivo o fornecimento de água tratada, por meio do processo de ultrafiltração (UF), ao campus da UFRJ localizado na Cidade Universitária. Os resultados demonstraram a aplicabilidade e funcionalidade do programa desenvolvido. Com base nos parâmetros definidos, foi estimado um custo operacional mensal da UF correspondente a aproximadamente 3,45% do custo projetado, no cenário atual, para o processo convencional, evidenciando a viabilidade econômica da tecnologia. Mesmo no primeiro ano, considerando o investimento necessário para a implantação da planta, o custo anual representa cerca de 5,76% do valor que seria cobrado à UFRJ, reforçando o potencial da UF como alternativa eficiente e economicamente vantajosa.

7 REFERÊNCIAS

ÁGUAS DO RIO. Legislação e Tarifas. Disponível em: <https://aguasdoriorio.com.br/legislacao-e-tarifas/>. Acesso em: 11 jul. 2025.

ALMEIDA, Herivanda Gomes de; CAVALCANTE, José da Silva; ARAÚJO, Cláudio Dias; MIERZWA, José Carlos; MOTA, Francisco Soares Batista. **Ultrafiltração aplicada ao tratamento de água: uma alternativa aos sistemas tradicionais de tratamento.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 32., 2023, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: ABES, 2023.

ANANTONY, Alice; LOW, Jor How; GRAY, Stephen; CHILDRESS, Amy E.; LE-CLECH, Pierre; LESLIE, Greg. **Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review.** Journal of Membrane Science, v. 383, n. 1–2, p. 1–16, 2011..

ASTEN. Produto Eletromecânico. Disponível em: <https://asten.com.br/capa.asp?eletromecanicos=produto&procodigo=56&depcodigo=793>. Acesso em: 12 jun. 2025.

BAKER, Richard W. **Membrane Technology and Applications.** 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2012. 543 p. ISBN 978-0-470-74372-0.

BERNARDO, Guilherme Legramanti. **Avaliação da variabilidade experimental nos parâmetros de resposta de membranas de ultrafiltração.** 2017. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

CHEW, Chun Ming; AROUA, Mohamed Kheireddine; HUSSAIN, Mohd Azlan; ISMAIL, Wan Mohd Zamri Wan. **Evaluation of ultrafiltration and conventional water treatment systems for sustainable development: an industrial scale case study.** Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 3152–3163, 2016.

COMERCIAL LANEL. Thebe Bomba THS 18 – 40 CV (Tri) P55IR34VNovart136. Disponível em: <https://www.comerciallanel.com.br/thebe-bomba-ths-18-40-cv-trifip55ir34vnovart136-0040000018687-p3319>. Acesso em: 12 jun. 2025.

FENG, Chuan Yuan; PENG, Feng; WU, Heng; SU, Zhi Guo; JIANG, Zhi Yong. **Recent progresses in polymeric hollow fiber membrane preparation, characterization and applications.** Separation and Purification Technology, v. 111, p. 43–71, 2013.

FERREIRA, Eduardo da Silva Braga; SALVIANO, André Felipe; OLIVEIRA, Sérgio Soares Leite; ARAÚJO, Elvira Maria; MEDEIROS, Vanessa Nunes; LIRA, Heitor Luiz. **Hollow fiber membranes of several materials and their applications.** Research, Society and Development, v. 10, n. 1, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i1.11206.

FILHO, Jacques Lara Bidone. **Avaliação do desempenho operacional de um sistema de ultrafiltração para tratamento de água utilizando um coagulante inorgânico e um derivado de tanino.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Química.

HABERT, A. C., BORGES, C. P., & NOBREGA, R. (2006). **Processos de Separação por Membranas.** Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda.

HINADA. Ultrafiltration Membrane (NM UF 250). Guangzhou: Hinada Water Treatment Tech Co., Ltd., [s.d.]. Disponível em: <https://www.hinada.com/product/ultrafiltration-membrane-nm-uf-250/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

HOFMAN, Johannes Antonius Maria Henricus; BEERENDONK, Evelien F.; REIJNDERS, Sander J. G.; DE WIJS, Annemieke M. A. **Enhanced surface water treatment by ultrafiltration.** Desalination, v. 119, p. 113–125, 1998.

JACK, Anne M.; SMITH, Mary K.; MCGUIRE, Michael J.; GRAHAM, Nigel J. D. **Using PAC-UF to treat a low-quality surface water.** Journal - American Water Works Association, Denver, v. 90, n. 11, p. 83–95, 1998.

KAESER COMPRESSORES. Sopradores. Disponível em: <https://br.kaeser.com/produtos-e-solucoes/sopradores/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

KEHREIN, Philipp; VELDMAN, Sonja; RIEDEL, Dirk; KREWITT, Moritz; BERG, Gerd; ZANDVOORT, Marcel; ROEST, Korneel. **A techno-economic analysis of membrane-based advanced treatment processes for the reuse of municipal wastewater.** Journal of Water Reuse and Desalination, London, v. 11, n. 4, p. 705–725, 2021..

LOJA DO MECÂNICO. Compressor de Ar Bravo CSL 2HP 10 pés 100L trifásico 220/380V Schulz 9217851-0. Disponível em: <https://www.lojadomecanico.com.br/produto/4185/21/159/compressor-de-ar-bravo-csl-2hp-10-pes-100l-trifasico-220380v-schulz-9217851-0/153/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

MAHON, H. I. *Hollow fiber permeators.* United States Patent No. 3,228,876, 11 jan. 1966.

MÉRITO COMERCIAL. Bomba Monoestágio Schneider BC-92S 1B – 1 CV Trifásica 220V/380V sem Intermediário. Disponível em: <https://www.meritocomercial.com.br/bomba-monoestagio-schneider-bc-92s-1b-1-cv-trifasica-220v380v-sem-intermediario-4001001001388-p1031165>. Acesso em: 13 jun. 2025.

METCALF, Eddy; TCHOBANOGLIOUS, George; BURTON, Franklin L.; STENSEL, H. David. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery.** 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

NAIME, Roberto. **As águas superficiais.** EcoDebate, 10 mar. 2011. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2011/03/10/as-aguas-superficiais-artigo-de-roberto-naime/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

OLIVEIRA, Luane Seixas de. **Tratamento de água com elevada carga sólida para consumo humano por ultrafiltração: análise preliminar de parâmetros físico-químicos e operacionais.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) – Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, AM, 2019.

OLIVEIRA, Thiago Forteza de. **Tratamento de água para abastecimento público por sistema de separação por membrana de ultrafiltração: estudo de caso na ETA Alto da Boa Vista (São Paulo, SP).** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo.

ORNELAS, Handerson Pontes de Oliveira. **Caracterização de membrana de fibra oca de poli(fluoreto de vinilideno) e sua aplicação como módulo de ultrafiltração no tratamento**

de água com matéria orgânica. 2021. Dissertação (Mestrado em Química) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Química.

PEIG, Daniel Brooke. **Modelo para otimização do projeto de sistemas de ultrafiltração.** 2011. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PERSALT MEMBRANES. Ultrafiltration (UF) & MBR. Tampa, FL: Persalt. Disponível em: <https://www.persaltmembranes.com/membranes/uf/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

PRESSGAGE. Instrumentos de Medição e Controle. Disponível em: <https://www.pressgage.com.br/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

PROVITEC. Bombas. Disponível em: <https://www.provitec.com.br/bombas>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SANTOS, Edilson Mesquita dos. **Possibilidades de redução da toxicidade e do desperdício de água para melhorar a qualidade dos despejos nos corpos receptores.** 2020. Artigo (Bacharelado em Química) — Núcleo de Educação a Distância, UNINTER, Cerquilho, 2020.

SCOTT, K. **Handbook of Industrial Membranes.** Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1995. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=oKepTILQPVUC>. Acesso em: 18 abr. 2025.

SILVA, Izaque Bento da. **Desenvolvimento de um software em linguagem VBA para dimensionamento de instalações de água fria.** 2019. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, Pau dos Ferros, 2019.

TORAY. Toray UF Projection Tool. Disponível em: <https://www.water.toray/knowledge/tool/ufsoftware/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

WARMLING, Luiz Vitor Mazorana; MELO, Aline Resmini; MARQUES, Carolina Resmini Melo; CAMPOS, Débora De Pellegrin. **Dimensionamento de um sistema de osmose reversa para reúso de efluente na indústria têxtil.** Revista Vincci – Periódico Científico da UniSATC, v. 9, n. 2, p. 251–277, ago./dez. 2024.

WESCHENFELDER, Silvio Edegar. **Aplicação de membranas cerâmicas para o tratamento de água produzida em unidades marítimas de produção de petróleo.** 2015. 247 f. Tese (Doutorado em Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

WU, J.; WANG, Y.; ZHANG, D.; GAO, Z.; LIU, Y.; ZHANG, Y.; LI, X.; WANG, J. **Facile preparation of Ag₂CO₃/GO-modified PVDF composite membranes with enhanced anti-fouling and antibacterial properties for ultrafiltration.** Chemosphere, v. 286, p. 131799, 2022.

XU, Jia; CHANG, Jiyoung; CHOO, Kwang-Ho; KIM, Seung-Jin; DIAO, Huijuan; FANE, Anthony G. **Pilot study of inside-out and outside-in hollow fiber UF modules as direct pretreatment of seawater at low temperature for reverse osmosis.** Desalination, v. 219, p. 179-189, 2008.

ANEXO A – Modelo de materiais

Figura A. 1 - Bomba de alimentação modelo THEBE/THS-18.



Fonte: COMERCIAL LANEL,2025.

Figura A. 2 - Soprador modelo ASTEN/CRC-4 610 36 TS.



Fonte: ASTEN,2025.

Figura A. 3 - Bomba dosadoras modelo AWM 5000-MB 5000 / 59009.



Série AWM

Fonte: PROVITEC,2025.

Figura A. 4 - Bomba de limpeza e descarte modelo SCHNEIDER / BC-92 S 1C.



Fonte: COMERCIAL LANEL,2025.