



---

**ValorNatural** – Valorização de Recursos Naturais através da Extração de Ingredientes de Elevado Valor Acrescentado para Aplicações na Indústria Alimentar.

---

## Entregável nº 6.3.2

**Versão do Documento:** 1

**Data de Submissão:** 28/02/2021

**Responsável:** INEGI

**Nome do Documento:** Dossiê técnico do sistema laboratorial de produção de hidratos de CO<sub>2</sub>.

### Histórico de Revisão

Revisão	Data	Parceiros Envolvidos	Descrição
R 1.0	28/02/2021	Paralab, FEUP-LSRE	

**Lista de Autores**

Cláudia Almeida

Luís Pedro Esteves

Miguel Mota

Simão Mateus



## Sumário

Neste entregável serão apresentados os diferentes esforços levados a cabo para o projeto do sistema laboratorial de produção de hidratos de CO<sub>2</sub>. Neste documento irão constar as seguintes informações:

- Perspetiva geral da instalação a implementar;
- Lista de componentes não *standard* e suas características;
  - Modelos 3D dos componentes;
  - Princípio de operacionalidade;
  - Condições de projeto e simulações;
- Lista de componentes *standard*, mais concretamente componentes de automação, controlo e aquisição de dados apresentando um custo de referência e possíveis fornecedores;
- Esquema elétrico dos sistemas de controlo e aquisição de dados e diagrama de blocos/processo da operacionalidade do sistema;

Perspetiva-se que será de todo conveniente que com a entrega da instalação seja fornecido este documento assim como documentos auxiliares que venham a ser necessários a estudos futuros como é o caso de:

- Orçamentos de equipamentos *standard*;
- Orçamentos de equipamentos não *standard*;
- Desenhos 2D dos componentes não *standard*.



# Índice

Sumário .....	4
1. Identificação .....	7
2. Introdução.....	8
3. Contextualização .....	8
3.1. Química do Processo.....	11
4. Desenvolvimento do sistema.....	13
4.1. Perspetiva da instalação .....	14
4.2. Equipamentos Personalizados .....	15
4.2.1. NETmix (H-E-1) .....	15
4.2.2. Visualizador (H-E-2).....	16
4.2.3. Extrator (H-E-3) .....	17
4.2.4. Serpentina (G-E-2) .....	29
4.3. Equipamentos <i>Standard</i> .....	29
4.3.1. Equipamentos de sensorização e monitorização .....	29
4.3.2. Equipamentos de controlo .....	30
4.3.3. Equipamentos de segurança .....	31
4.3.4. Equipamentos de aquecimento/arrefecimento.....	32
4.3.5. Equipamentos periféricos .....	33
4.4. Automação e Controlo .....	34
4.4.1. Esquema elétrico .....	34
4.4.2. Diagrama do processo .....	34
Anexo A .....	36
Anexo B.....	41

## 1. Identificação

<b>Deliverable</b>	6.3.2 Dossiê técnico do sistema laboratorial de produção de hidratos de CO <sub>2</sub> .
<b>Tipo de deliverable</b>	Dossiê técnico
<b>Nível de disseminação</b>	Confidencial
<b>PPS</b>	6. Inovação em processos de extração, refinação e técnicas de conservação.

## 2. Introdução

No âmbito do Projeto Valor Natural (PPS6, atividade 20), pretende-se desenvolver uma unidade de produção de hidratos de dióxido de carbono com recurso à tecnologia NETmix. O NETmix será utilizado para mistura gás-líquido, mais concretamente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em condições gasosas com água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) líquida. Vantagens inerentes a uma instalação deste tipo incluem uma melhoria na eficiência da mistura entre as diferentes fases e, conseqüentemente, uma melhor eficiência na formação de hidratos de  $\text{CO}_2$ . Uma vez que a reação química é altamente exotérmica, será relevante uma eficiente remoção de calor, algo a que a tecnologia NETmix responde com elevados coeficientes de transferência de calor.

O conceito de funcionamento desta instalação consiste na mistura de água com uma corrente de dióxido de carbono para posterior formação de hidratos de  $\text{CO}_2$ . A mistura entre estas duas correntes, promovida na rede do NETmix, irá permitir uma correta mistura, aumentando a área interfacial de contacto entre ambos os reagentes e permitindo uma produção eficiente de hidratos. O extrator de hidratos irá permitir remover o excesso de água e obter os hidratos sólidos. O intuito será o fornecimento de hidratos de dióxido de carbono que possam ser bons substitutos do gelo na conservação de alimentos.

## 3. Contextualização

De acordo com o procedimento descrito, existe a necessidade de um reservatório para o armazenamento de água (com o intuito de permitir variações no consumo de água), um NETmix que irá promover a mistura entre as duas correntes e a permitir a reação entre os dois reagentes, um separador que permita extrair o excesso de água líquida e a obtenção de hidratos sólidos que permitam a sua utilização final e um *chiller* de arrefecimento que irá permitir atingir as temperaturas necessárias no reator NETmix, para além dos componentes principais, componentes como bombas, válvulas, sensores, medidores, controladores e outros serão necessários. Na Figura 1, apresenta-se um diagrama detalhado da instalação de produção de hidratos idealizada.



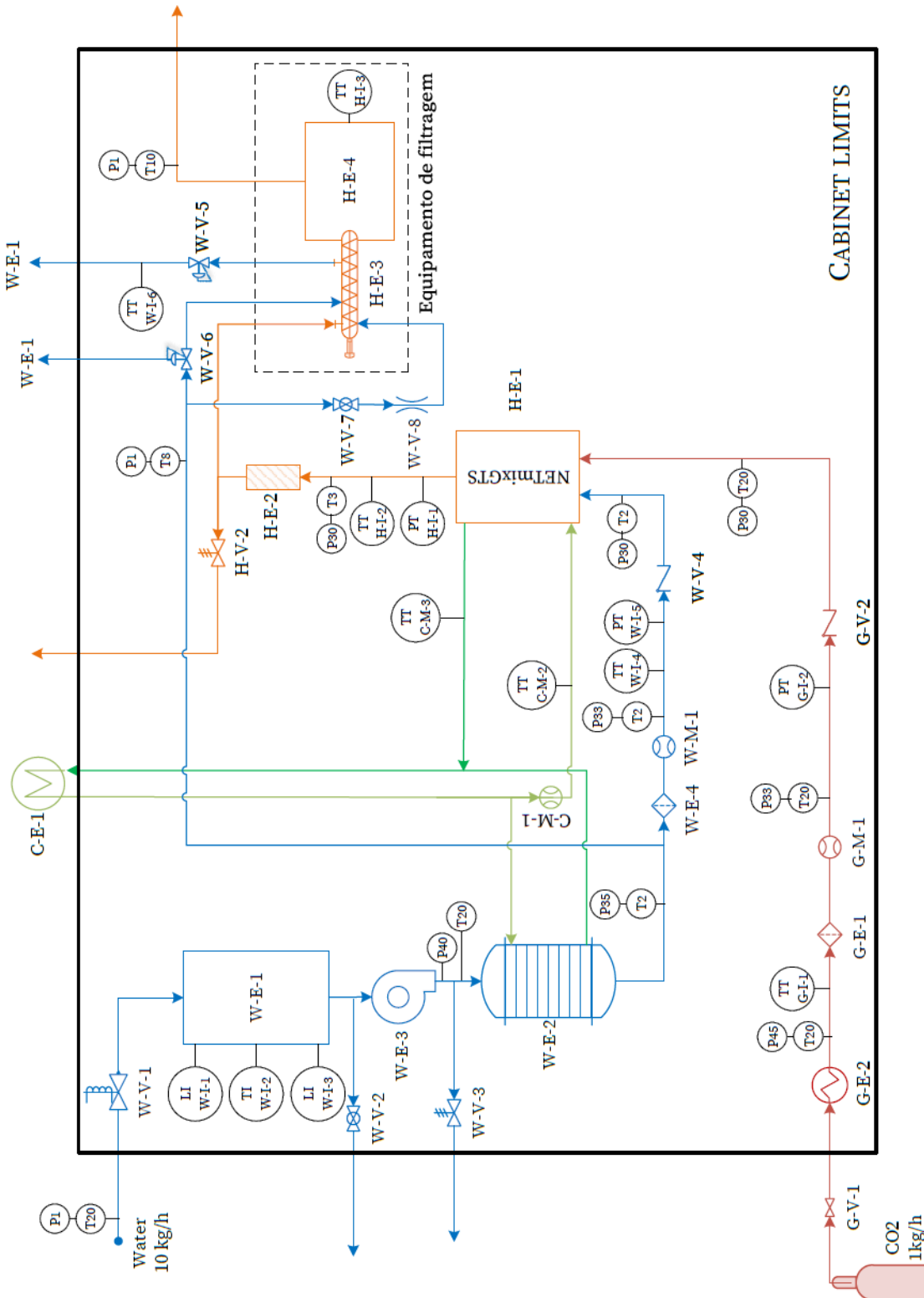


Figura 1 - Diagrama do processo da instalação de refinação.

Apresenta-se na Tabela 1 a legenda do diagrama de processo presente na Figura 1.

*Tabela 1 - Legenda do diagrama de processo*

<b>Código</b>	<b>Rede</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Descrição</b>
<b>W-V-1</b>	Água	Válvula	Válvula solenoide de enchimento
<b>W-E-1</b>	Água	Depósito	Depósito de água
<b>W-I-1</b>	Água	Sensor	Sensor de nível superior
<b>W-I-2</b>	Água	Sensor	Sensor de temperatura
<b>W-I-3</b>	Água	Sensor	Sensor de nível inferior
<b>W-V-2</b>	Água	Válvula	Válvula de descarga do depósito
<b>W-V-3</b>	Água	Válvula	Válvula de segurança
<b>W-E-3</b>	Água	Bomba	Bomba de água
<b>W-E-2</b>	Água	Permutador	Permutador de placas
<b>W-E-4</b>	Água	Filtro	Filtro de água
<b>W-M-1</b>	Água	MFC	Controlador de caudal de água
<b>W-V-4</b>	Água	Válvula	Válvula de sentido único
<b>W-I-4</b>	Água	Sensor	Sensor de temperatura
<b>W-I-5</b>	Água	Sensor	Transdutor de pressão
<b>W-V-6</b>	Água	Válvula	Controladora de pressão com descarga
<b>W-V-7</b>	Água	Válvula	Válvula de corte
<b>W-V-8</b>	Água	Válvula	Restritor de caudal
<b>W-I-6</b>	Água	Sensor	Sensor de temperatura
<b>G-V-1</b>	Gás	Válvula	Redutor da garrafa de gás
<b>G-E-2</b>	Gás	Serpentina	Serpentina de aquecimento
<b>G-E-1</b>	Gás	Filtro	Filtro de gás
<b>G-M-1</b>	Gás	MFC	Controlador de caudal de gás
<b>G-V-2</b>	Gás	Válvula	Válvula de sentido único
<b>G-I-1</b>	Gás	Sensor	Sensor de temperatura

<b>G-I-2</b>	Gás	Sensor	Transdutor de pressão
<b>H-E-1</b>	Hidratos	Reator	Reator NETmix
<b>H-I-1</b>	Hidratos	Sensor	Transdutor de pressão
<b>H-I-2</b>	Hidratos	Sensor	Sensor de temperatura
<b>H-E-2</b>	Hidratos	Visualizador	Visualizador de hidratos-V-2
<b>H-V-2</b>	Hidratos	Válvula	Válvula de segurança
<b>H-E-3</b>	Hidratos	Extrator	Extrator de hidratos
<b>H-E-4</b>	Hidratos	Coletor	Coletor de hidratos
<b>H-I-3</b>	Hidratos	Sensor	Sensor de temperatura
<b>C-E-1</b>	Refrigerante	Chiller	Chiller de arrefecimento
<b>C-M-1</b>	Refrigerante	Sensor	Medidor de caudal
<b>C-M-2</b>	Refrigerante	Sensor	Sensor de temperatura
<b>C-M-3</b>	Refrigerante	Sensor	Sensor de temperatura

### 3.1. Química do Processo

De modo a definir as condições de operação das principais peças da instalação, foi necessária uma análise pormenorizada ao diagrama de fases do dióxido de carbono (apresentado na Figura 2). Concluiu-se que, para promover a formação de hidratos, se deverá limitar a temperatura mínima de operação a 0 °C, evitando o congelamento da água e que a pressão do dióxido de carbono deverá ser sempre superior a 10 bar.

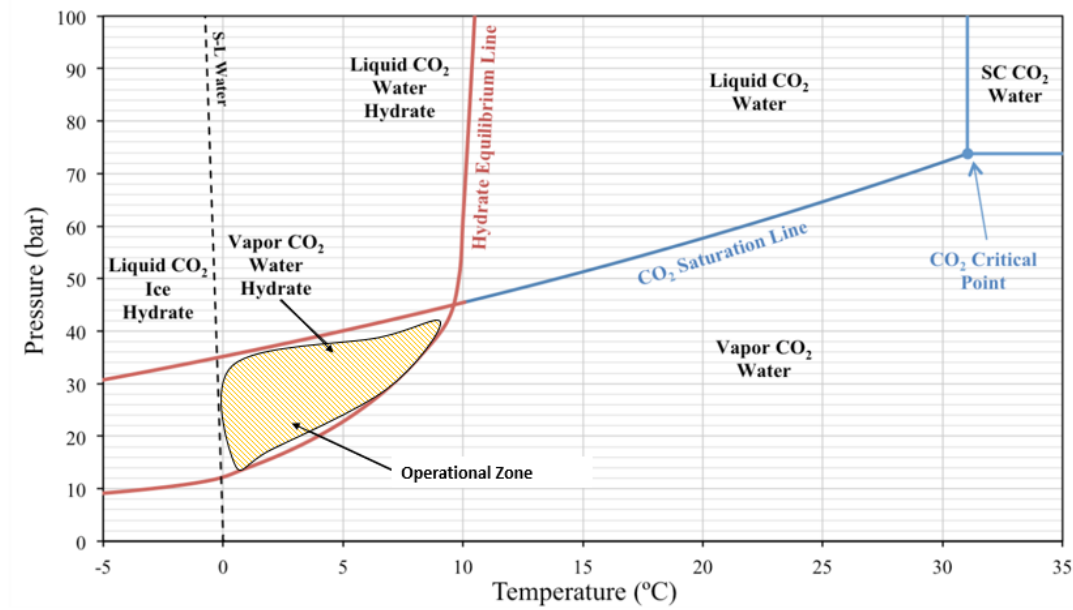


Figura 2 - Diagrama de fases do dióxido de carbono.

Tendo em conta o diagrama de fases presente na Figura 2 rapidamente se observa que a zona de trabalho é limitada não apenas por limites mínimos de funcionamento como também por limites máximos. No caso da temperatura não se torna possível a formação de hidratos de dióxido de carbono acima dos 10°C. No que diz respeito à pressão, o valor máximo aceite serão, aproximadamente, os 45 bar. Resumindo, a gama de temperatura de funcionamento situa-se entre os 0°C e os 10°C. A nível de pressões de funcionamento trabalhar-se-á entre os 10 e os 45 bar.

Na Tabela 2, apresenta-se uma lista das principais peças da instalação de produção de hidratos, de acordo com a legenda da Figura 1 e Tabela 1 e as respetivas condições de operação definidas.

Tabela 2 - Lista dos principais equipamentos da instalação de produção de hidratos de CO<sub>2</sub> e respetivas condições operatórias.

Referência	Peça/Equipamento	Temperatura (°C)	Pressão (bar)
H-E-1	NETmix	0-10	10-45
H-E-2	Visualizador	0-10	10-45
H-E-3	Separador/Extrator	0-10	10-45
H-E-4	Difusor/Distribuidor	0-10	Atmosférica

Relativamente ao NETmix, definiu-se um diâmetro hidráulico de ~0.5 mm, sendo que o diâmetro da câmara é de 3.3 mm. De forma a minimizar o efeito da parede no escoamento foi definido um mínimo de 7 colunas e que o comprimento do NETmix deve ser no mínimo 5 vezes superior à sua largura (para a garantir uma mistura completa das fases permitindo uma maior taxa

de reação). Através do cálculo dos números de Reynolds para diferentes misturas de CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, foi definido que o Reynolds nos canais do NETmix deve ser superior a 300. É ainda de referir que o NETmix deverá possuir um permutador de calor com alhetas. O caudal de produção deverá rondar 1 kg/h.

No que diz respeito ao extrator, o caudal de produção deverá ser idêntico ao caudal de produção do reator com o intuito de evitar acumulações no equipamento ou falta de produção. O equipamento apresentará um elemento de filtragem que irá permitir a remoção do excesso de água líquida e um elemento compressivo que irá forçar este excesso de água pelo elemento de filtragem, comprimindo os hidratos sólidos, produto final a obter.

## 4. Desenvolvimento do sistema

No que diz respeito ao desenvolvimento da instalação laboratorial este teve por base o diagrama de processo presente na Figura 1. Identificaram-se quais os componentes que necessitariam de ser fabricados à medida e quais os equipamentos que seriam passíveis de ser adquiridos no mercado.

Assim, como equipamentos que necessitaram de ser projetados tendo em vista a sua funcionalidade, capacidades térmicas e estruturais e que necessitaram de um projeto de fabrico identificam-se os seguintes:

- NETmix (H-E-1) – misturador de fases;
- Visualizador (H-E-2) – componente para visualização da produção de hidratos;
- Extrator (H-E-3) – separador das fases em análise;

Estes serão apresentados em detalhe na secção 4.2 referindo informação como:

- Configuração e desenhos 3D;
- Condições de projeto e funcionamento;
- Montagem.

Paralelamente foi efetuado um levantamento dos equipamentos *standard* utilizados na operabilidade da instalação como um todo. Identificam-se 5 categorias deste tipo de equipamentos/acessórios:

- Equipamentos de sensorização e monitorização;
- Equipamentos de controlo;
- Equipamentos de segurança;
- Equipamentos de aquecimento e arrefecimento;
- Equipamentos periféricos.

Estas categorias serão abordadas na secção 4.3 e em cada uma serão apresentadas quais as suas funções e a caracterização do modelo de cada fabricante. Para alguns destes será ainda possível apresentar valores orçamentados de possíveis fornecedores.

#### 4.1. Perspetiva da instalação

A título de introdução na esquematização da instalação laboratorial apresenta-se na Figura 3 a disposição tridimensional dos principais equipamentos que farão parte da instalação. É também possível visualizar qual a estrutura de suporte à instalação que será utilizada e fabricada.

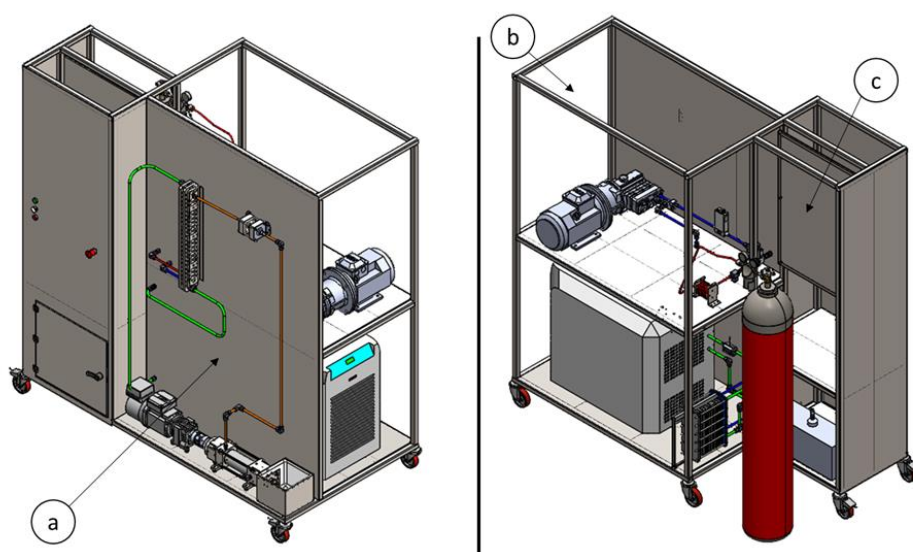


Figura 3 - Perspetiva isométrica do layout da instalação.

É possível salientar a partir da figura os seguintes aspetos:

1. A estrutura apresenta 3 zonas distintas:
  - a. Zona de Operação;
  - b. Zona de Acesso;
  - c. Zona de Controlo Elétrico.
2. A estrutura apresenta na Zona de Acesso um painel perfurado que facilita a montagem dos diversos equipamentos;
3. A estrutura apresenta na Zona de Operação os principais equipamentos de interação com o operador;
4. A estrutura apresenta na Zona de Controlo Elétrico a reunião de todos os elementos de automação.

## 4.2. Equipamentos Personalizados

### 4.2.1. NETmix (H-E-1)

Nesta secção será apresentado todo o desenvolvimento efetuado no que diz respeito ao NETmix onde será efetuada a mistura entre o dióxido de carbono e a água a uma pressão de funcionamento em torno dos 30 bar(g). O NETmix tem uma configuração patenteada e apresenta uma sucessão de câmaras e canais em malha com uma volumetria interna de, aproximadamente 6 mililitros.

O NETmix apresenta uma entrada para cada fluido, ou seja, admite separadamente o dióxido de carbono e a água. Após esta injeção, ambos os fluidos entram na rede NETmix onde se realiza a mistura e, posteriormente, a mistura é encaminhada para um canal de saída e conduzida para a tubagem respetiva. Em paralelo, ocorre a termostatização do reator NETmix através de placas de permuta de calor e a estanquicidade dá-se devido à vedação que recorre a *o-rings* que, por sua vez, são fechados recorrendo a duas placas de fecho.

Na Figura 4 apresenta-se a primeira perspetiva do respetivo equipamento numa vista em corte que possibilita a visualização do interior, em que cada uma destas seções se encontra devidamente identificada.

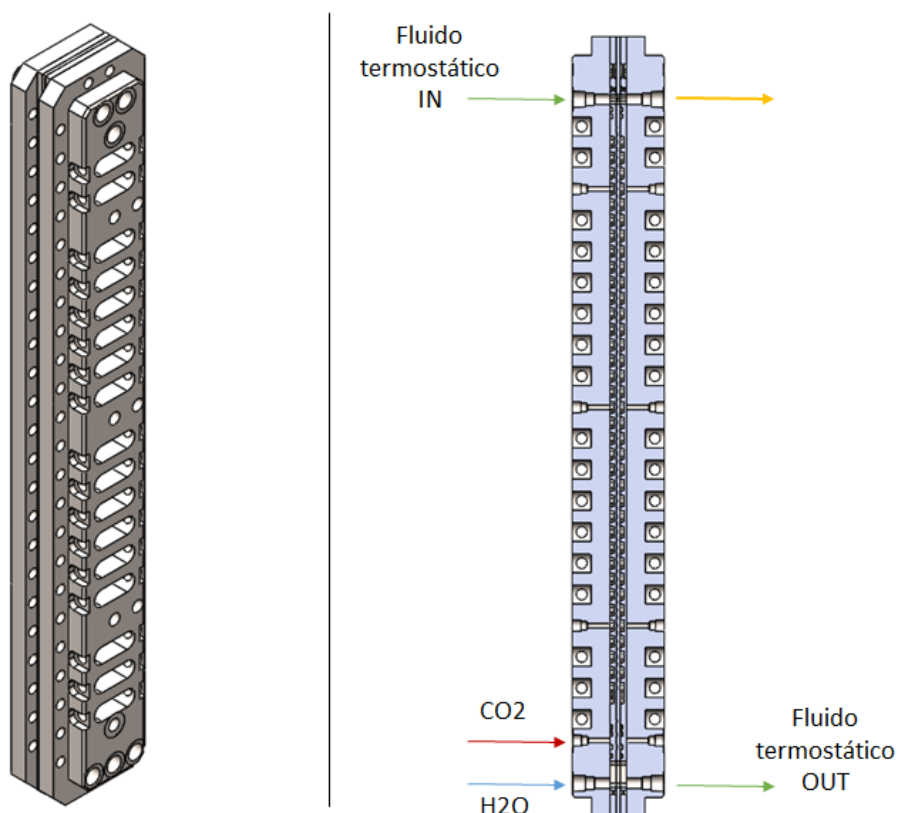


Figura 4 - NETmix de perspetiva isométrica e detalhe das correntes de fluido.

Para melhor compreender o que sucede no interior deste reator/misturador apresenta-se na Figura 5 tanto a representação da placa de mistura NETmix como a placa de permuta de calor.

Relativamente ao NETmix, definiu-se um diâmetro hidráulico de, aproximadamente, 0.5 milímetros, sendo que o diâmetro da câmara é de 3.38 milímetros. De forma a minimizar o efeito da parede no escoamento foi definido um mínimo de 15 colunas e que o comprimento do NETmix deve ser, no mínimo, entre 3 e 5 vezes superior à sua largura (para a garantir uma mistura completa das fases). Através do cálculo dos números de Reynolds para diferentes misturas de  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ , foi definido que o Reynolds nos canais do NETmix deve ser superior a 300. É ainda de referir que o NETmix deverá possuir um permutador de calor de alhetas, no seu interior, para garantir a termostatização do mesmo.

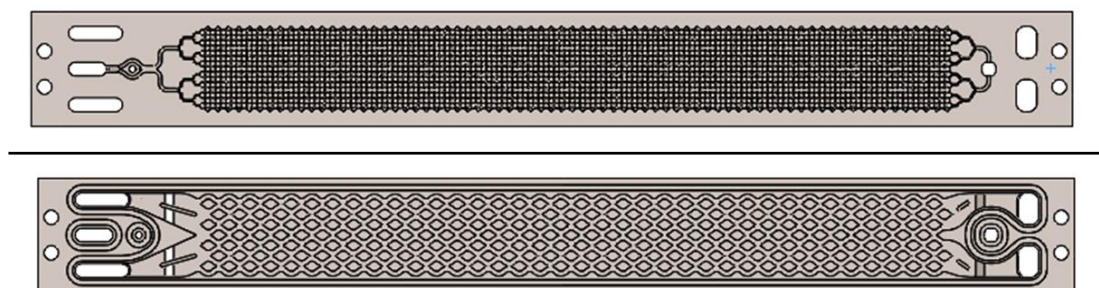


Figura 5 - Placa NETmix em cima; Placa de termostatização em baixo.

Espera-se assim obter eficiências de mistura elevadas recorrendo a esta tecnologia distinta e inovadora que permitam tornar todo o processo do qual faz parte integrante uma solução de elevado valor acrescentado.

#### 4.2.2. Visualizador (H-E-2)

O Visualizador terá como principal função permitir ao operador validar a formação de hidratos, em tempo real, permitindo assim afinar as condições de entrada.

Para se conseguir realizar esta ação, o visualizador é fabricado num material translúcido que permite a visualização do escoamento, enquanto não interfere com a hidrodinâmica do escoamento. A sua construção está desenhada para suportar as condições de funcionamento com os devidos coeficientes de segurança associados.

Na Figura 6 apresenta-se uma esquematização do interior do visualizador assim como do aspeto exterior do mesmo. Do lado esquerdo é possível analisar o seu aspeto exterior em que se prevê a utilização de um componente em acrílico transparente para permitir a visualização do



processo no seu interior. Na figura do lado direito representa-se uma imagem da geometria em corte, para se compreender a sua simples, mas funcional construção.

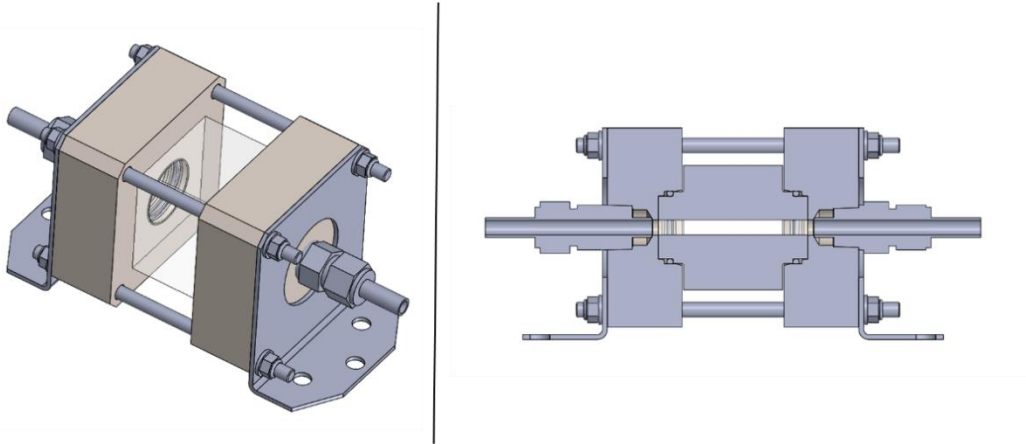


Figura 6 – Visualizador; Vista isométrica à direita; Vista em corte à esquerda.

#### 4.2.3. Extrator (H-E-3)

O extrator de hidratos (H-E-3) tem como principal função separar a água (excedente do processo químico de produção de hidratos) dos hidratos em **contínuo**. Esta característica é inovadora e visto nunca antes experimentada, teve-se em conta no projeto do extrator a possibilidade de afinar parâmetros de operação de modo a se tirar o maior rendimento deste processo.

##### Componentes do Extrator

Na Figura 7 apresentam-se os componentes do extrator. Este é constituído por um **fuso** que irá compactar os hidratos no **corpo de saída**, ao mesmo tempo que promoverá a filtragem da água através do **filtro poroso**. Faz-se a admissão da mistura de hidratos pelo **corpo e entrada** tangencialmente ao barril exterior. O **cone misturador** pretende prevenir a aglomeração/cristalização de hidratos na saída e agir como sede de válvula para comandar a passagem de hidratos. A passagem de hidratos é comandada pelo **êmbolo** que atua como válvula limitadora de pressão, abrindo para um valor de pressão estipulado. A água excedente é recolhida no interior do **tubo exterior** e sai pelo **corpo de saída**. O acesso ao **êmbolo** é efetuado através da **tampa do êmbolo**. O acesso ao **vedante** radial é realizado desmontando o **corpo de entrada**. O fuso é fixado axialmente pelo **rolamento de contacto angular de duas carreiras** que se encontra fixado entre o **corpo dos rolamentos** e a **tampa**. O extrator será montado numa base guarnecida de **sinoblocos** de modo a absorver vibrações.

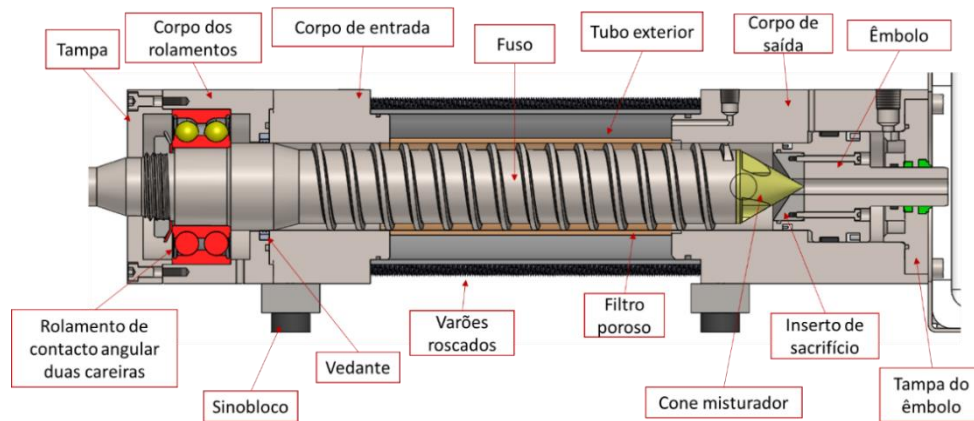


Figura 7 - Componentes do extrator.

O extrator estará ligado a um **motorreductor** através de um **acoplamento Rotex®** como demonstrado na Figura 8. Os hidratos serão descarregados para uma **câmara termostaticada**, objeto do PPS.6.3.4. Na Figura 8 apresentam-se as cotas de atravancamento geral do sistema.

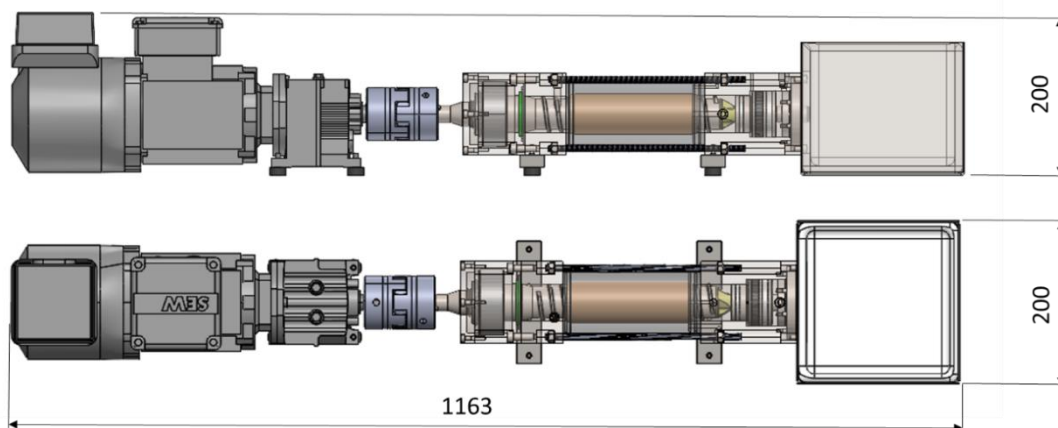


Figura 8 - Atravancamento geral do sistema de extração de hidratos.

### Princípio de funcionamento

Nesta secção apresentam-se as quatro fases do processo de funcionamento idealizado para o **extrator**. Estes são:

- Enchimento de água;
- Enchimento de hidratos;
- Extração de hidratos;
- Retorno do êmbolo.

Enchimento de água

Nesta fase pretende-se homogeneizar o campo de pressões dentro do **extrator** e verificar a existência de fugas na zona de extração de hidratos. Apresenta-se a azul a zona que se espera que a água que vem do *NETmix* ocupe. A amarelo apresenta-se a água contida na câmara de

comando. Esta será alimentada diretamente a partir da bomba ou recirculando a água filtrada no **filtro poroso**.

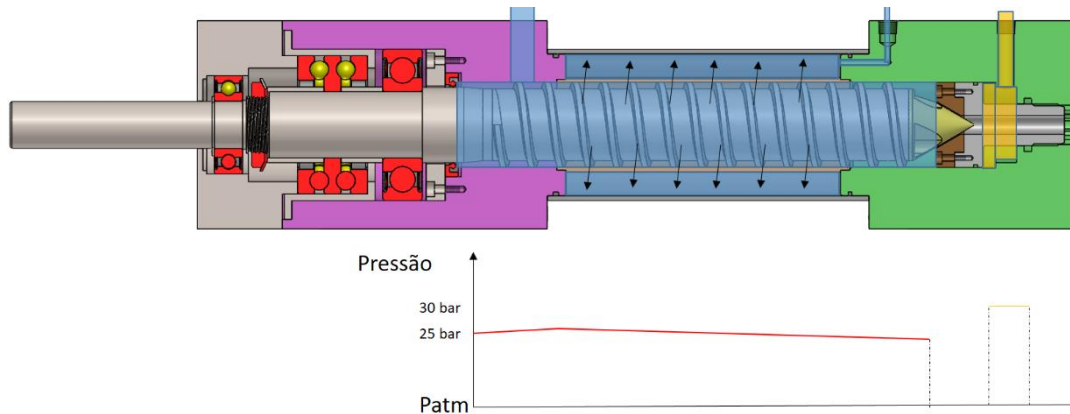


Figura 9 - Enchimento de água e perfil axial de pressões esperado.

#### Enchimento de hidratos

Após efetuada a estabilização de pressões e verificadas as fugas, pode-se dar início ao processo de enchimento de hidratos. A mistura hidratos/água comporta-se como um gel (suspensão coloidal). Ao ser introduzida ela irá ocupar a zona branca apresentada na figura. A água presente na mistura passará o **filtro** enquanto as partículas presentes na mistura serão encaminhadas, pela ação do **fuso**, para a parte posterior do **extrator**.

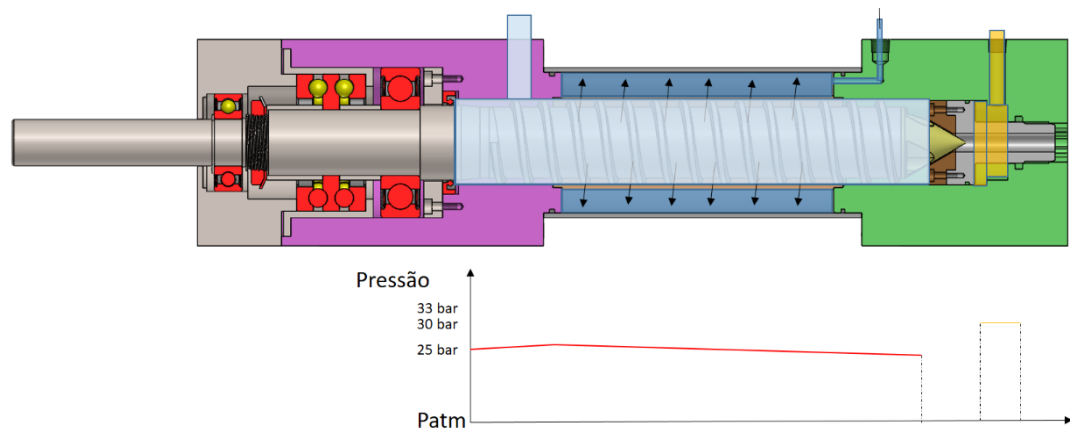


Figura 10 -Fase inicial do enchimento de hidratos.

A acumulação de hidratos na parte posterior do **extrator** conduzirá a um aumento de pressão e consequente compactação de hidratos nessa zona, como apresentado na figura. Assim que a pressão atingida pelos hidratos é suficiente para promover o deslocamento do **êmbolo** dá-se início o processo de extração de hidratos.

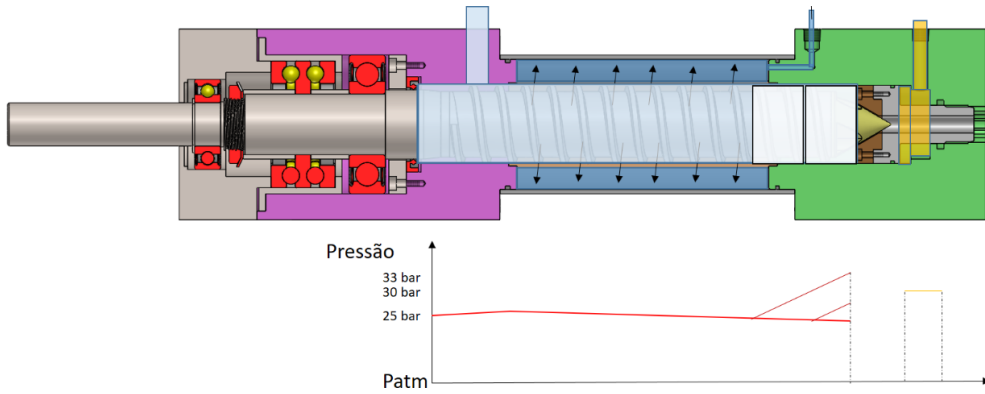


Figura 11 - Fase final do enchimento de hidratos.

Extração de hidratos

Os hidratos escoarão pelo canal interno do **êmbolo**, sendo a pressão rapidamente reduzida (Figura 12).

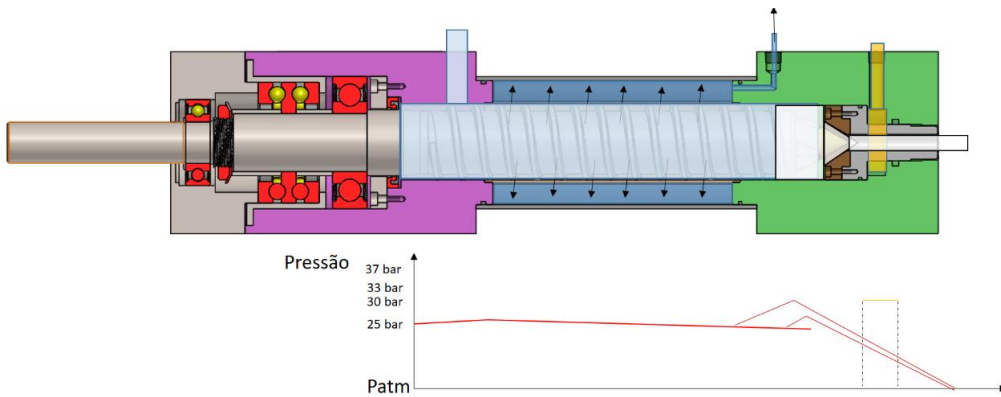


Figura 12 - Fase de extração de hidratos.

Retorno do êmbolo

Assim que a pressão dos hidratos for inferior à pressão definida de fecho, o êmbolo iniciará o movimento de retorno.

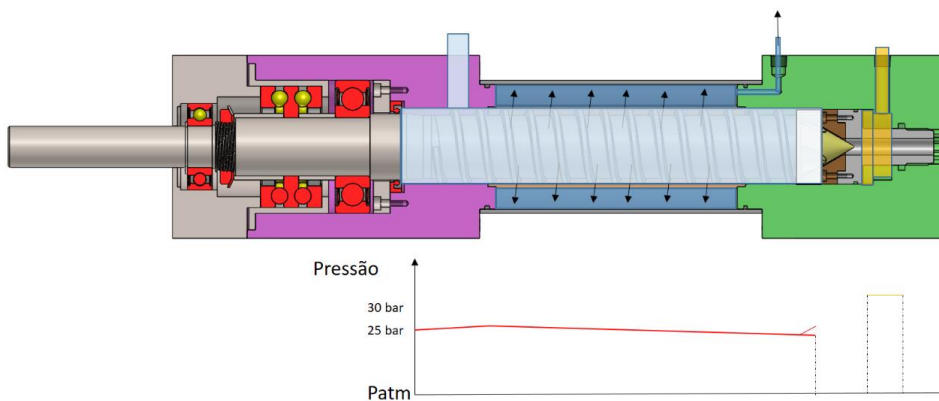


Figura 13 - Fase de retorno do êmbolo.

### Dimensionamento do fuso

Para o dimensionamento dos parâmetros geométricos do fuso foram utilizadas as seguintes premissas:

1. Entrada
  - a. Área transversal do canal **semelhante** à área interna do **tubo de entrada**;
  - b. Gel comporta-se como um **fluido newtoniano** com viscosidade igual ao dobro da viscosidade da água a 3°C.
2. Zona de filtragem
  - a. **Diâmetro externo do fuso** determinado pelo **diâmetro interno do tubo poroso**;
  - b. Apenas a água passa pelo **poroso**;
  - c. A perda de carga introduzida na linha de água é calculada pela **eq. de Darcy**.
3. Saída
  - a. Extração de um fluido quase sólido – escoamento em tampão – utilização de **teoria de parafusos de potência**.

Em consequência dividiu-se o **fuso** nas seguintes áreas:

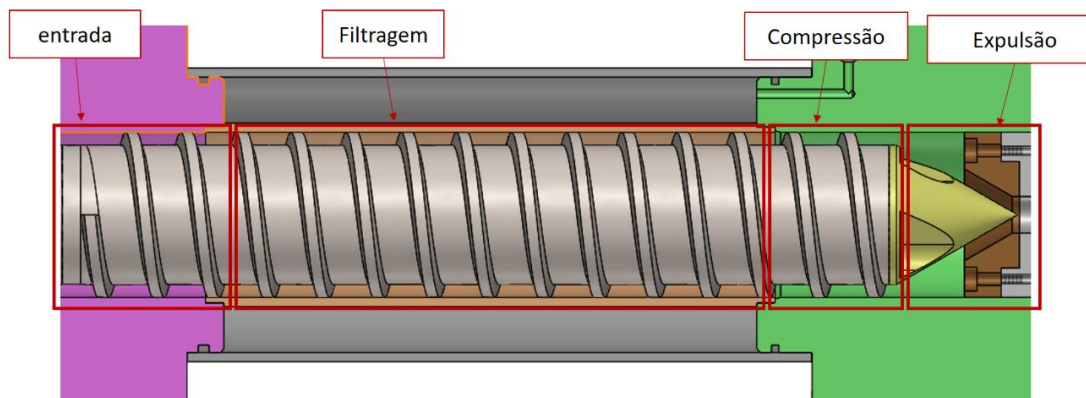


Figura 14 - Áreas representativas de cada premissa.

### Projeto fuso

#### Parâmetros geométricos

O diâmetro do **tubo poroso** escolhido foi de 50 mm (Figura 15). Deste modo o diâmetro máximo do **fuso** é de 45 mm.

Designation / ordering guide

ISOSTATIC TUBES				
TYPE	"Ø D" Outer diameter [mm]	"L" Length [mm]	"e" Wall thickness [mm]	"S" Filtration area [cm <sup>2</sup> ]
IS 14.250	14	250	2,0	110
IS 17.600	17	600	2,0	320
IS 20.600	20	600	2,0	434
IS 30.600	30	600	2,5	565
IS 35.600	35	600	2,5	660
IS 40.600	40	600	2,5	754
IS 50.600	50	600	2,5	942
IS 60.600	60	600	2,5	1131
IS 80.600	80	600	3,0	1508
IS 100.600	100	600	3,0	1885
IS 17.900	17	900	2,5	481
IS 23.1000	23	1000	2,5	723
IS 30.1000	30	1000	2,5	942
IS 35.1000	35	1000	2,5	1100
IS 40.1000	40	1000	2,5	1257
IS 50.1000	50	1000	2,5	1571
IS 60.1000	60	1000	2,5	1885
IS 80.1000	80	1000	3,0	2513
IS 100.1000	100	1000	3,0	3142

Customized design available upon request: send your requirement to [poral.sales@poral.org](mailto:poral.sales@poral.org)  
 PORAL® standard designation: IS diameter.length.grade Ex IS 30.600.05

Figura 15 - Seleção de tubo poroso.

O **tubo de entrada** é de 8 mm. Assim, a área interna é de 32 mm<sup>2</sup>. Os parâmetros geométricos do **fuso** (Figura 16) devem apresentar uma área transversal semelhante a 32 mm<sup>2</sup>. O ajustamento destes parâmetros, levou aos seguintes resultados:

- Altura do canal –  $H = 3,5$  mm;
- Largura do canal –  $W = 12$  mm;
- Passo do fuso –  $P = 15$  mm;
- Ângulo de hélice –  $\gamma = 6^\circ$ .

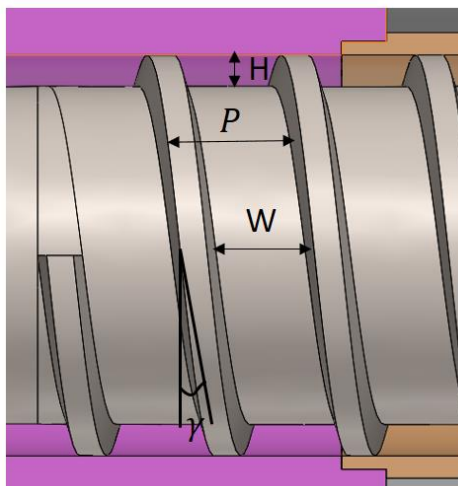


Figura 16 - Parâmetros geométricos do fuso.

A área transversal do canal é de 42 mm<sup>2</sup>. Áreas mais pequenas levam a alturas muito pequenas, ou ângulos de hélice muito baixos.

A velocidade de rotação do fuso é definida tendo em conta o volume de hidratos a extrair por unidade de tempo. Considerando que estes apresentam escoamento em tampão, ou seja, por cada volta do fuso é arrastado o volume compreendido numa volta (Figura 17). Assumindo um

caudal volúmico de 2,3 l/h de hidratos tem-se que a velocidade de rotação do fuso deverá ser 70 rpm.

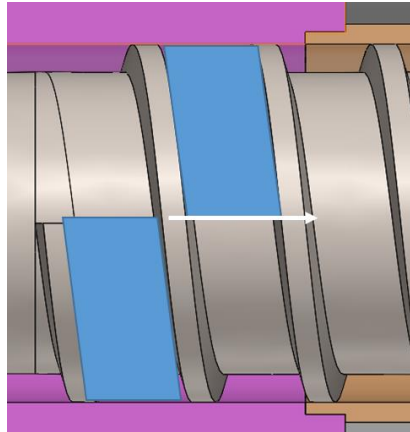


Figura 17 - Volume arrastado por volta do fuso.

#### Potência necessária no motor

Assumindo que será necessário vencer uma pressão de 70 bar para extrudir os hidratos, pode-se calcular o binário necessário tendo em conta a expressão:

$$M_t = \frac{P d_m}{A} \frac{\tan \phi + \tan \gamma}{2 (1 - \tan \phi \tan \gamma)} \quad (1)$$

Tendo em conta os parâmetros geométricos apresentados, o binário necessário é de 15 Nm. Tendo em conta a velocidade de rotação é possível saber-se a potência necessária:

$$P_{extrusão} = M_t \times \omega \quad (2)$$

A potência necessária para extrudir os hidratos é de 107 W.

Foram calculadas as potências necessárias para colmatar a perda de carga da entrada e da filtragem de água, no entanto estes valores são residuais e não se apresentam no relatório.

#### Seleção do motorreductor

Optou-se por escolher um **motorreductor** com 0,37 kW e velocidade de saída de 77 rpm (Binário nominal de 46 Nm). Este deve poder ser controlado através de um variador de frequência de modo a ajustar a velocidade de rotação e afinar parâmetros. O **motorreductor** deve ser equipado com ventilação forçada de modo a evitar o sobreaquecimento nesse modo de funcionamento.

**Motorreductor** pré-selecionado: R07DRN71M4/TF/V da SEW EURODRIVE

### Dimensionamento estrutural do fuso

Considerando o binário máximo imposto pelo motorreductor e uma força ortogonal ao eixo do fuso provocada por um “desequilíbrio” que possa existir, dimensionou-se o veio utilizando o critério de Von Mises. Na Figura 18 apresenta-se o diagrama de corpo livre do fuso com as forças e reações consideradas para o cálculo de dimensionamento do fuso.

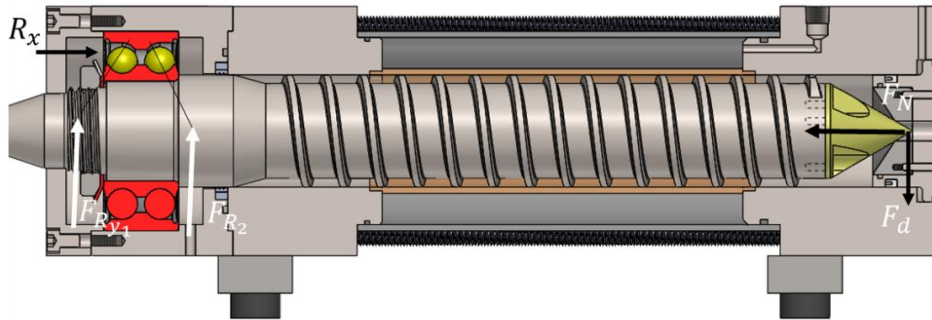


Figura 18 - Diagrama de corpo livre do fuso.

1. Forças				
<b>Forças e reações aplicadas no veio</b>				
força normal	F_normal	15000	N	
Forças desequilíbrios	F_desequilíbrios	100	N	
Binário motor	B_motor	46	Nm	
Reação no rolamento axial	R_1	15000	N	
Reação no 1º rolamento radial	R_y_1	-624	N	
Reação no 2º rolamento radial	R_y_2	724	N	
Distância entre o 1º e o 2º rolamentos	a	46	mm	
Distância entre o 1º e a ponta do veio	b	333	mm	
2. Diagramas de esforços				
<b>2.1 Momento torsor</b>				
Momento torsor	M_t	46	Nm	
<b>2.1 Momento fletor</b>				
x=0	M_f	0	Nm	
x=a	M_f	29	Nm	
x=b	M_f	0	Nm	
3. Diâmetro mínimo da secção do veio				
Critério de Von Mises				
Tensão de cedência do material	sigma_y	170000000,00	Pa	
Fator de segurança	lambda	2,00		
Diâmetro calculado	D	18,05	mm	

Figura 19 - Processo de cálculo e diâmetro mínimo do fuso.



O diâmetro mínimo do veio deve ser 16,97 mm (Figura 19). Nenhum troço do veio tem diâmetro inferior ao obtido.

#### Seleção de rolamento

A seleção de rolamento está intrinsecamente ligada à projeção do veio, uma vez que só após a seleção deste se podem calcular as reações de apoio. O rolamento deve permitir a fixação axial de veio, sustentando a sua carga, assim como compensar quaisquer cargas radiais complementares.

**Rolamento** pré-selecionado: 3208 A da SKF

#### Projeto êmbolo

O **êmbolo** foi projetado para realizar o retorno com uma pressão na câmara 2 bar inferiores à pressão na zona de saída dos hidratos (Figura 20). Exemplo:

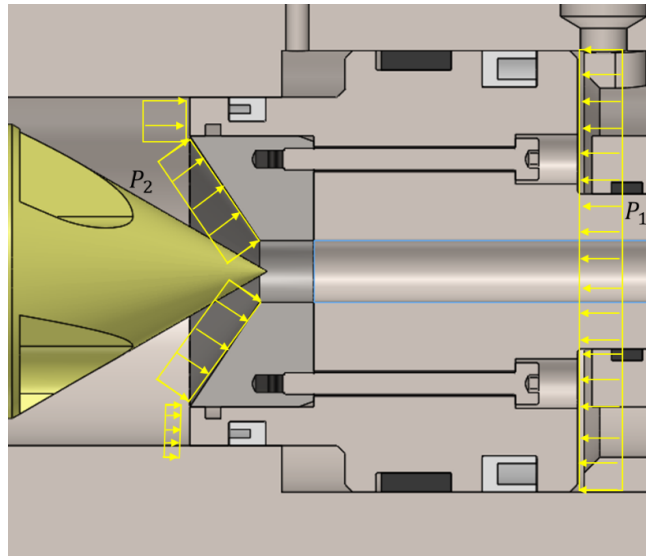


Figura 20 - Diagrama de corpo livre do êmbolo.

$$P_1 \times A_1 > P_2 \times A_2$$

Tendo como dimensões:

	Dimensões			
Diâmetro exterior - água	D_a	0,05700	m	
Diâmetro exterior - hidratos	D_h	0,04500	m	
diâmetro de contacto	d_1	0,02190	m	
Diâmetro do tubo	d_2	0,01000	m	
Diâmetro da haste	d	0,02200	m	
Diâmetro batente	d_3	0,05200	m	
ângulo de fecho	theta	0,95993	rad	

Figura 21 - Dimensões consideradas no êmbolo.

2.4	êmbolo encostado ao batente - início do movimento para esquerda			
Pressão água	P_1	2400,00	kPa	
Força equivalente 1	F_1	4184,60	N	
Pressão hidratos	P_2	2767,79	kPa	
Força equivalente 2	F_2	4184,60	N	
Reação no batente	R_2	0,00	N	

Figura 22 - Somatório de forças no êmbolo.

Para o caso em que a pressão na **câmara** seja de 24 bar, o **êmbolo** realiza o retorno assim que a pressão no lado dos hidratos desça para 2767 kPa, como apresentado na Figura 22.

#### Pré-cargas dos parafusos de fecho

Dimensionaram-se as pré-cargas dos parafusos tendo em conta a pressão de projeto: 70 bar. Nesta secção apresenta-se os resultados obtidos para cada um dos componentes fixados.

Tampa do êmbolo

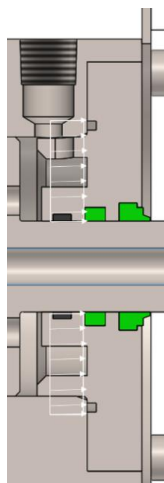


Figura 23 - Pressão interna a atuar na tampa do êmbolo.

	M5 cabeça hexagonal			
Pressão de dimensionamento	P_dim	7,00	Mpa	Input
Área de contacto	A	3216,99	mm <sup>2</sup>	
Força	F	22518,94	N	
Número de parafuso	N	8,00		
Força por parafuso	F_p	2814,87	N	
Força por parafuso em kN	F_p	2,81	kN	
Válido?		sim		
Fator de seg		23%		

Figura 24 – Cálculo do número de parafusos necessário para a tampa do êmbolo.

A **tampa do êmbolo** levará 8 parafusos M5-70.

Tampa

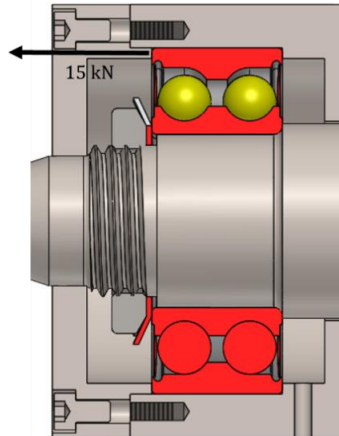


Figura 25 - Força aplicada na tampa.

	M6			
Força	F	15000,00	N	
Número de parafuso	N	4,00		
Força por parafuso	F_p	3750,00	N	
Força por parafuso em kN	F_p	3,75	kN	
Válido?		sim		
Fator de seg		35%		

Figura 26 - Cálculo do número de parafusos necessário para a tampa.

A **tampa** levará 4 parafusos M6-80.

Corpo de rolamentos

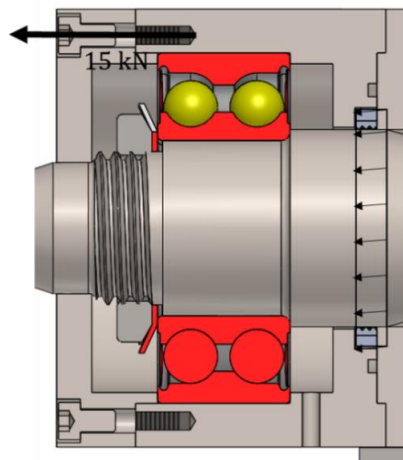


Figura 27 - Forças aplicadas no corpo de rolamentos.

0. Input				
		<b>M8</b>		
Pressão de dimensionamento	P_dim	7,00	Mpa	Input
Área de contacto	A	1830,76	mm <sup>2</sup>	
Força	F	27815,34	N	
Número de parafuso	N	4,00		
Força por parafuso	F_p	6953,84	N	
Força por parafuso em kN	F_p	6,95	kN	
Válido?		sim		
Fator de seg		38%		

Figura 28 - Cálculo do número de parafusos necessário para o corpo de rolamentos.

O **corpo de rolamentos** levará 4 parafusos M8-70.

Corpos de entrada e saída

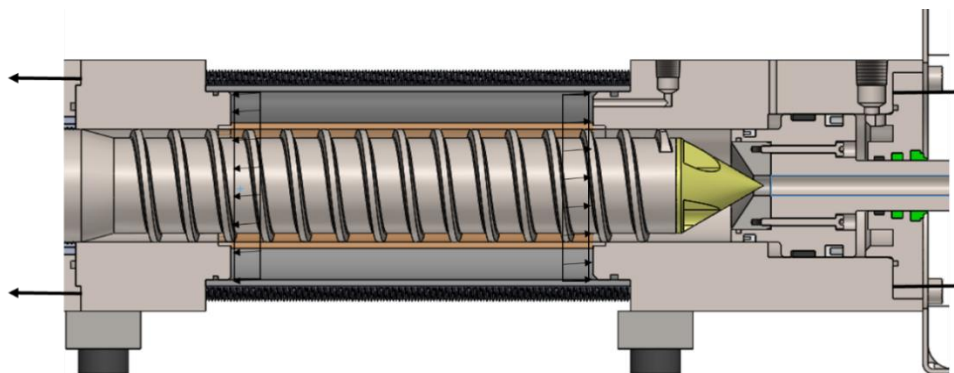


Figura 29 - Forças aplicadas nos corpos de entrada e saída.

0. Input				
		<b>M8</b>		
Pressão de dimensionamento	P_dim	7,00	Mpa	Input
Área de contacto	A	2827,43	mm <sup>2</sup>	
Força	F	47607,38	N	
Número de parafuso	N	4,00		
Força por parafuso	F_p	11901,84	N	
Força por parafuso em kN	F_p	11,90	kN	
Válido?		sim		
Fator de seg		21%		

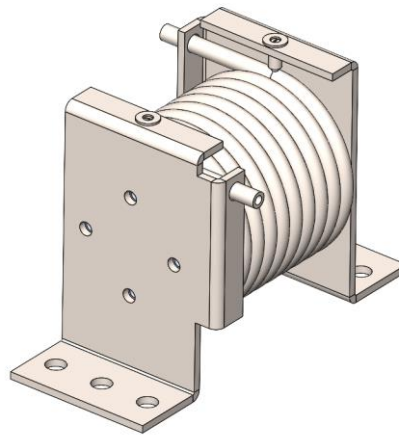
Figura 30 - Cálculo da classe de varão roscado a utilizar.

Os **corpos de entrada e saída** estarão ligados por 4 varões roscados M8-80.

#### 4.2.4. Serpentina (G-E-2)

Para o caso da serpentina G-E-2 esta faz parte da corrente de dióxido de carbono que se encontra a 30 bar(g). A serpentina G-E-2 pretende garantir que, independentemente do estado a que saia o dióxido de carbono da garrafa, este seja alimentado ao sistema na fase gasosa. Para isso foi considerada uma resistência elétrica de 100 W resultando num enrolamento em serpentina de 7 voltas com um diâmetro de enrolamento de, aproximadamente, 70 milímetros. Esta resistência poderá ser limitada em termos de corrente de alimentação para permitir um melhor controlo da temperatura à entrada do NETmix.

Na Figura 31 é possível observar a configuração a utilizar para a serpentina G-E-2.



*Figura 31 - Serpentina de aquecimento.*

### 4.3. Equipamentos *Standard*

Nesta seção serão apresentados os equipamentos *standard* considerados na montagem que irão permitir o controlo, a monitorização, garantir a segurança e que todos os equipamentos funcionem de forma correta e em conjunto para que consigam comunicar ao mesmo bloco central e garantir um funcionamento estável e sólido de toda a instalação.







#### 4.3.1. Equipamentos de sensorização e monitorização

Servem os elementos de sensorização e monitorização para receber toda a informação necessária sobre o funcionamento do sistema. Nesta categoria integram-se os seguintes equipamentos:

- Sensores de pressão;
- Sensores de temperatura;
- Sensores de nível;
- Caudalímetros.

Na Tabela 3 resume-se toda a informação necessária como: descrição; referência; foto ilustrativa; quantidades e custo de referência para estes equipamentos.

Tabela 3 - Lista de Equipamentos de Sensorização e Monitorização.






Descrição	Imagem	Fabricante	Modelo	QTD	Custo/unid.
Sensor temperatura		Labfacility	SKU XE-3239-001	7	40€
Sensor de pressão		Omega	PX329-2KGI	4	321€
Sensor de nível tipo boia		Cynergy3	RSF43Z100JC032	3	20€
Caudalímetro de água (@60bar)		Bronkhorst	M14-MAD-22-O-S	1	3.612€
Caudalímetro de dióxido de carbono (@60bar)		Bronkhorst	F-204AV-50K-MAD-99-K	1	1.818€
Caudalímetro do fluido termostatização		Cynergy3	UF25B100	1	320€

#### 4.3.2. Equipamentos de controlo

Os equipamentos de controlo permitem que o utilizador tenha controlo sobre a instalação, após receberem informação dos equipamentos de sensorização e serem manipulados pelo bloco central. Identificam-se como potenciais controlos a regulação do caudal, das pressões das linhas, das potências de aquecimento e arrefecimento (mesmo que em *display* próprio), entre outros. Também é importante referir que os caudalímetros se repetem, pois estes incorporam uma válvula à saída que é responsável por impor à instalação o caudal desejado.

Na Tabela 4 compila-se de forma sucinta toda a informação necessária como: descrição; referência; foto ilustrativa; quantidades e custo de referência.

Tabela 4 - Lista de Equipamentos de Controlo.


Descrição	Imagem	Fabricante	Modelo	QT D	Custo/uni d.
Caudalímetro de água (@60bar)		Bronkhorst	M14-MAD-22-O-S	1	3.612€
Caudalímetro de dióxido de carbono (@60bar)		Bronkhorst	F-204AV-50K-MAD-99-K	1	1.818€
BPR		Bronkhorst	P-702CM-ABD-88-E	1	3.160€
FPR		Alicat	PCDS-1000PSIG-D-PCA17	1	2686.5€
Bomba de água		HydraCell	MT08 N Sn J N SS	1	6.015€

#### 4.3.3. Equipamentos de segurança

Como toda a instalação de processos químicos que opera a elevadas pressões é necessário garantir que esta opera em segurança e sem colocar em perigo o utilizador. Para isso a instalação conta com elementos de segurança ativos e passivos. Como elementos passivos temos toda a programação que envolve a leitura da informação de pressão e temperatura e, em função das condições analisadas e se denotar uma situação iminente de perigo toma ações sobre os elementos de controlo de modo a controlar o processo e proteger o utilizador. Como elementos ativos podemos identificar as válvulas *relief* que atuam imediatamente assim que os valores predefinidos são atingidos. As válvulas *relief* irão funcionar como elementos de segurança do equipamento, a utilização de uma gama de operação baixa em pressão, não justifica a utilização de discos de rotura, estando assim a segurança do sistema assegurada segundo as boas práticas de engenharia. Assim podemos definir como valores limite das válvulas *relief* os 50/60 bar(g).

Na Tabela 5 resume-se toda a informação necessária como: descrição; referência; foto ilustrativa; quantidades e custo de referência.

*Tabela 5 - Lista de Equipamentos de Segurança.*

Descrição	Imagem	Fabricante	Modelo	QTD	Custo/unid.
Válvulas <i>Relief</i>		Hylok	RV2-H-4T	2	102€

#### 4.3.4. Equipamentos de aquecimento/arrefecimento

Nesta fase já é perceptível a necessidade de proceder ao aquecimento e arrefecimento dos diferentes fluidos nas suas diferentes fases. No que diz respeito ao aquecimento, apenas se irá promover o aquecimento da linha de gás com o intuito de garantir que o mesmo se encontra sempre na fase gasosa, evitando assim a presença de dióxido de carbono líquido. A serpentina e sua resistência elétrica já foram mencionadas na secção 4.2.4.




Relativamente ao arrefecimento identificaram-se diferentes situações onde era necessário, nomeadamente:

- À entrada da bomba de água de modo a baixar a temperatura até aos 2 °C à entrada do NETmix – Permutador de Placas W-E-2;
- No extrator de amostras H-E-3 caso haja necessidade de compensar o défice térmico da mistura;
- No interior do NETmix para garantir que a temperatura se mantém durante a mistura de ambas as fases.

Na Tabela 6 compila-se de forma sucinta toda a informação necessária como: descrição; referência; foto ilustrativa; quantidades e custo de referência.



Tabela 6 - Lista de Equipamentos de Aquecimento e Arrefecimento.

Descrição	Imagem	Fabricante	Modelo	QTD	Custo/unid.
Banho Termostático		Julabo	FL 1203	1	2.334€
Cartucho de resistência		-	Universal	1	~50€
Permutador de placas		AlfaLaval	AXP27-10H-F	1	836.16€






#### 4.3.5. Equipamentos periféricos

Como equipamentos periféricos resta anunciar todos os restantes equipamentos que permitem o correto funcionamento de todo o processo. Enumeram-se de seguida estes equipamentos:

- Válvulas de sentido único que permitem garantir que não existe retorno dos fluidos nessas linhas. Equipamentos: G-V-2 e W-V-4;
- Válvulas ON/OFF manuais que permitem o controlo das correntes de fluxo. Equipamentos: W-V-2,
- Equipamentos de filtragem, sejam a filtragem de sólidos e a filtragem de líquidos. Como filtragem de sólidos identifica-se o equipamento W-E-4 na linha de água e como filtragem de gases identifica-se o equipamento G-E-1 na linha de dióxido de carbono;
- Coletores, como é o caso do coletor de água E-17 que deverá ser contemplado para fazer o armazenamento e retenção da água.

Na tabela seguinte resume-se toda a informação necessária como: descrição; referência; foto ilustrativa; quantidades e custo de referência.

Tabela 7 - Lista de Equipamentos Periféricos.

Descrição	Imagem	Fabricante	Modelo	QTD	Custo/unid.
Válvula anti retorno		Hylok	CVA-M4N-S316	2	48€
Válvula ON/OFF		Hylok	HB2H-2T/ HB2H-4T	1	143€
Filtro		Hylok	FT-H-4T	2	76€
Válvula ON/OFF		Hylok/Prisma	SAHB1H2T Actuador PA00S	1	188.45€
Restritor		Hylok	NV1-H-2T	1	46.95€

#### 4.4. Automação e Controlo

Na secção de automação e controlo pretende-se reportar todos os esquemas que traduzem o controlo da instalação. Como esquemas relevantes para o controlo da instalação apresenta-se o esquema elétrico da instalação e o diagrama de processo com as funções de operação.

##### 4.4.1. Esquema elétrico

O esquema elétrico da instalação permite ao operador conhecer como se encontram efetuadas as ligações dos equipamentos e, caso posteriormente se verifique uma avaria ou a necessidade de se realizar uma alteração, facilmente através do esquema elétrico se identifica quais os canais de transmissão de dados ou potência que necessita de intervir. Os respetivos esquemas elétricos encontram-se no Anexo A.

##### 4.4.2. Diagrama do processo

Com o diagrama do processo é possível perceber as diferentes fases distintas do processo durante o arranque, regime permanente e término do processo. Estes diagramas podem também

ser entendidos como um manual de operação do sistema. Para análise do mesmo, este encontra-se exposto no ANEXO B.

# Anexo A

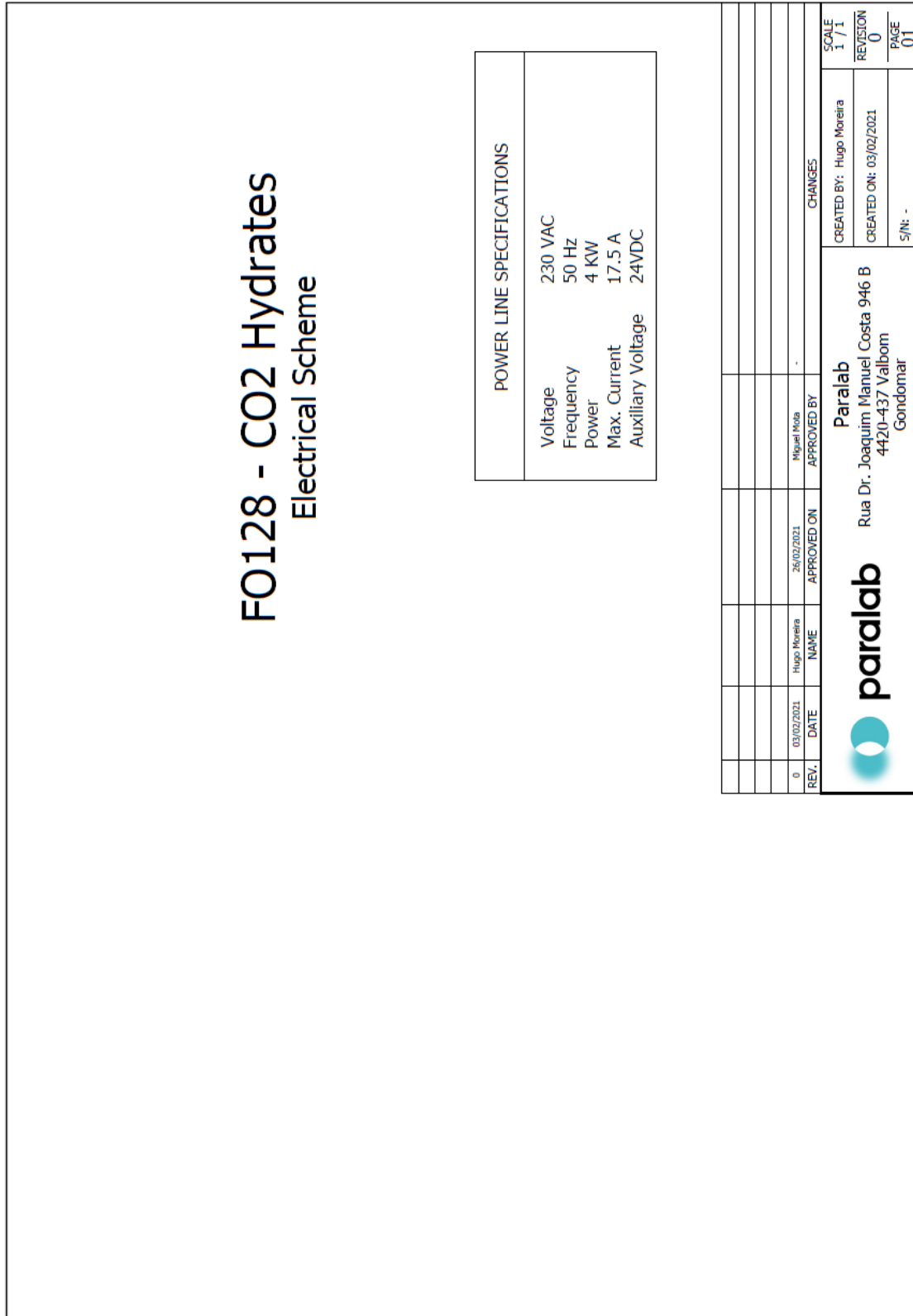


Figura 32 - Esquema Elétrico 01.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>COMPONENTS LIST</b>									
Reference	Description	Type							
ADAM4118_1	Signal Acquisition Module (Thermocouple)	8 Thermocouple Robust Modbus							
ADAM4118_2	Signal Acquisition Module (Digital Input)	8 Thermocouple Robust Modbus							
B1	General Power Distribution (Phase R)	Power Busbar - Neutral							
B2	General Power Distribution (Phase R)	Power Busbar - R Phase							
B3	General Power Distribution (Neutral)	Power Busbar - Neutral							
B4	Low Voltage Power Distribution (24DC)	DC Power Busbar - R Phase							
B6	Low Voltage Power Distribution (0V)	Power Busbar - GND							
B7	R5485 Communication Busbar (R5485+)	Communication Busbar - R485+							
BPL1	R5485 Communication Busbar (R5485-)	Communication Busbar - R485-							
CN1	H-E-3 Electric Back Pressure Regulator	Back Pressure Regulator							
COR1	C-M-1 Flow Meter	Flowmeter							
D1	W-M-1 Coriolis Mass Flow Controller	Coriolis							
D2	General Power Distribution	Differential Current CB - P+N							
D3	H-E-4 Motor Driver Power Supply	Thermomagnetic Circuit Breaker - 1P+N							
D4	DC Power Supply	Thermomagnetic Circuit Breaker - 1P+N							
D5	W-E-3 Pump Power Supply	Thermomagnetic Circuit Breaker - 1P+N							
D5	G-E-2 Heat Resistor Power Supply	Thermomagnetic Circuit Breaker - 1P+N							
DTCL1	G-E-2 Heat Resistor Temperature Controller	PID Temperature Controller							
E1	General Power Distribution	Socket Plug - 1P+N+E							
FPR1	H-E-3 Electric Front Pressure regulator	Front Pressure regulator							
G1	DC Power Supply	AC/DC Power Converter							
K1	General Power Distribution	Electromechanical Relay (24VDC) - 2P							
K2	W-E-3 Safety Relay	Level Sensor							
L1	W-E-1 Level Sensor (Max)	Level Sensor							
L2	W-E-1 Level Sensor (Min)	Level Sensor							
L3	W-E-1 Level Sensor (Safety)	Level Relay							
LR1	W-E-1 Level Relay	Electric Motor							
ME31	H-E-3 Electric Motor	Motor Fan							
ME32	H-E-3 Electric Motor	Mass Flow Controller							
MFL1	W-M-1 Mass Flow Controller	Pressure Transducer							
PT1	W-I-5 Pressure Transducer	Pressure Transducer							
PT2	G-I-2 Pressure Transducer	Pressure Transducer							
PT3	H-I-1 Pressure Transducer	Heat Resistor							
R1	G-E-2 Heat Resistor SSR	Solid State Relay - 1P							
S5R1	G-E-2 Heat Resistor SSR	Variable Frequency Drive							
VFD1	H-E-3 Motor Driver	Variable Frequency Drive							
WE31	W-E-3 Water Pump Motor Driver	Electric Motor							
WE32	W-E-3 Water Pump Motor	Electric Motor Fan							
XL1	W-E-3 Water Pump Motor Fan	Terminal							
XL2	External Connections Terminal (Thermocouple)	Thermocouple Terminal							
			<b>COLOR CODE</b>						
Type	Tension	Description	Color						
AC	230V	Phase	Brown						
		Neutral	Gray						
		24V+	Light Blue						
DC	24V	GND	Orange						
		Signal +	White						
		Signal -	Pink						
		R5485+	Purple						
		R5485-	Green						
Communication	-	TX	Yellow						
		RX	Green						
		GND	Yellow						
Protection	-		Black						
			Green/Yellow						
			<b>REVISIONS</b>						
REV.	DATE	NAME	CHANGES						
0	03/02/2021	Hugo Moreira							
APPROVED BY: Miguel Mota			APPROVED ON: 26/02/2021						
S/N: -			LOCATION: +L0						
<b>paralab</b>			Paralab Rua Dr. Joaquim Manuel Costa 946 B 4420-437 Valbom Gondomar			<b>Electrical Scheme</b> FO128 - CO2 Hydrates			
						SCALE 1 / 1			
						REVISION 0			
						PAGE 02			

Figura 33 - Esquema Elétrico 02.

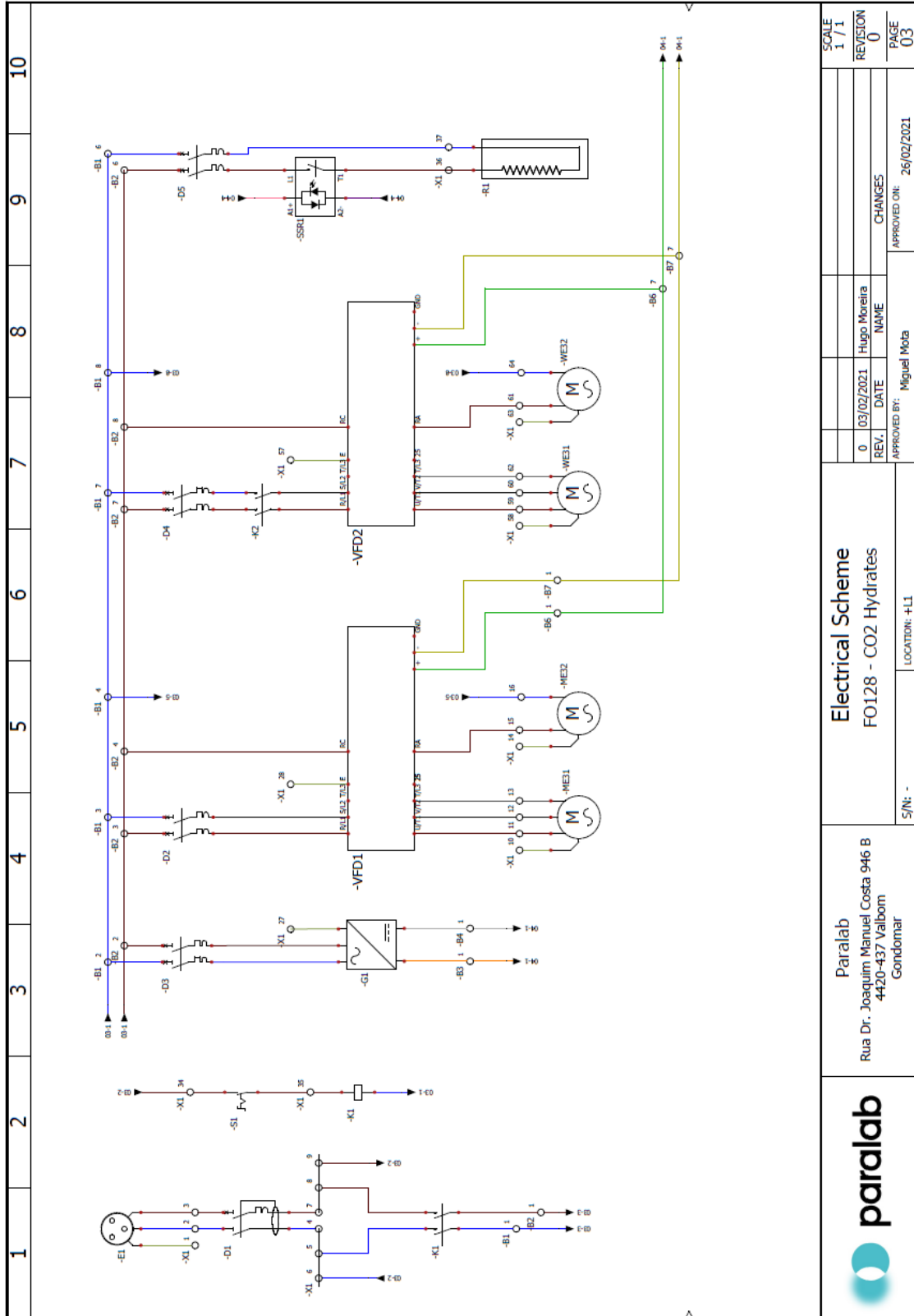


Figura 34 - Esquema Eléctrico 03.

	Paralab Rua Dr. Joaquim Manuel Costa 946 B 4420-437 Valbom Gondomar	Electrical Scheme FO128 - CO2 Hydrates		SCALE 1 / 1
		S/Nº: -	LOCATION: +L1	REVISION 0
APPROVED BY: Miguel Mota		REV. DATE NAME 0 03/02/2021 Hugo Moreira	CHANGES	PAGE 03
APPROVED ON: 26/02/2021		APPROVED ON: 26/02/2021		



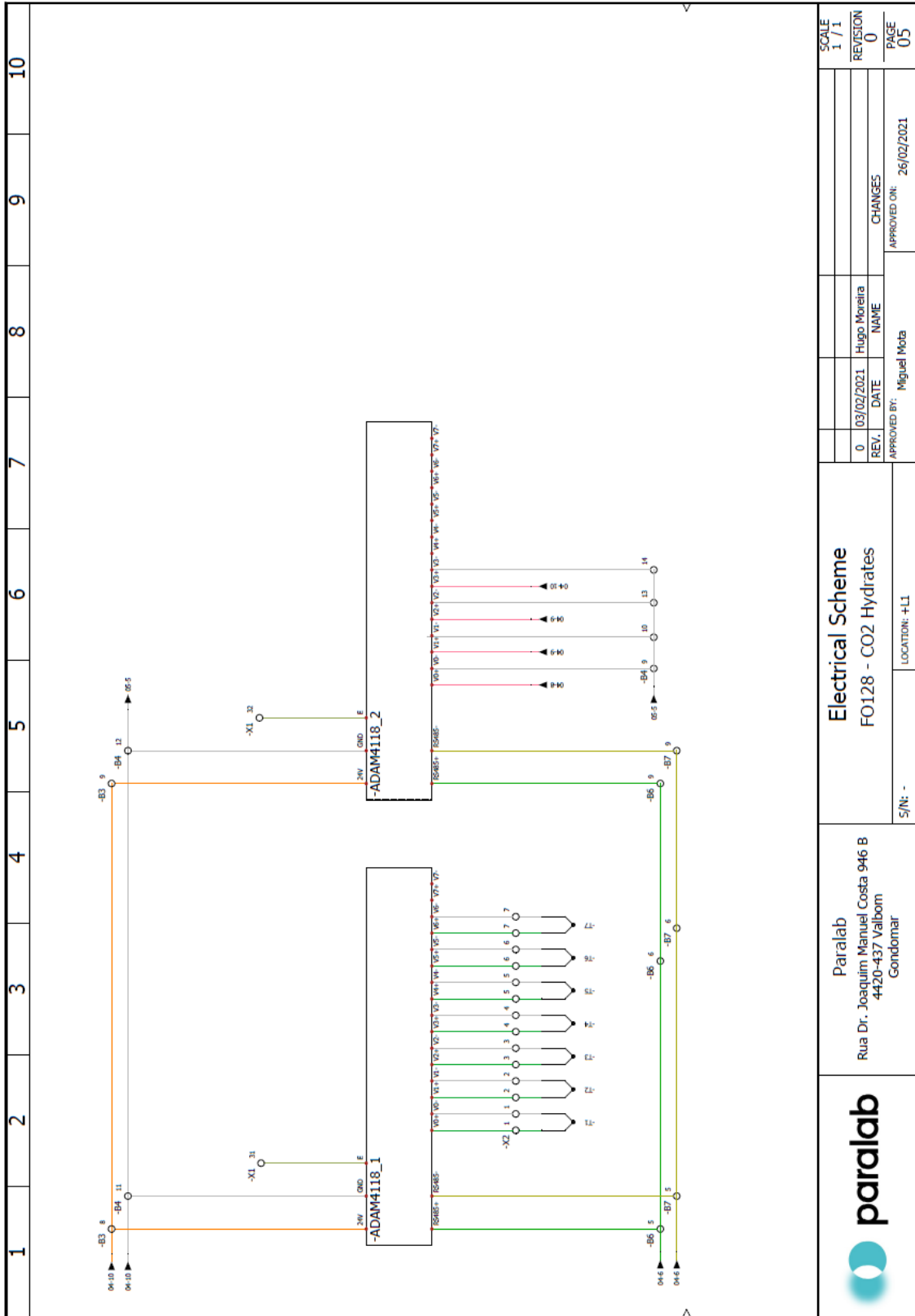


Figura 36 - Esquema Eléctrico 05.

SCALE 1 / 1		REVISION 0		PAGE 05	
REV. 0		DATE 03/02/2021		APPROVED BY: Miguel Mota	
NAME Hugo Moreira		CHANGES		APPROVED ON: 26/02/2021	
Electrical Scheme FO128 - CO2 Hydrates			LOCATION: +L1		
Paralab Rua Dr. Joaquim Manuel Costa 946 B 4420-437 Valbom Gondomar			S/N: -		



# Anexo B

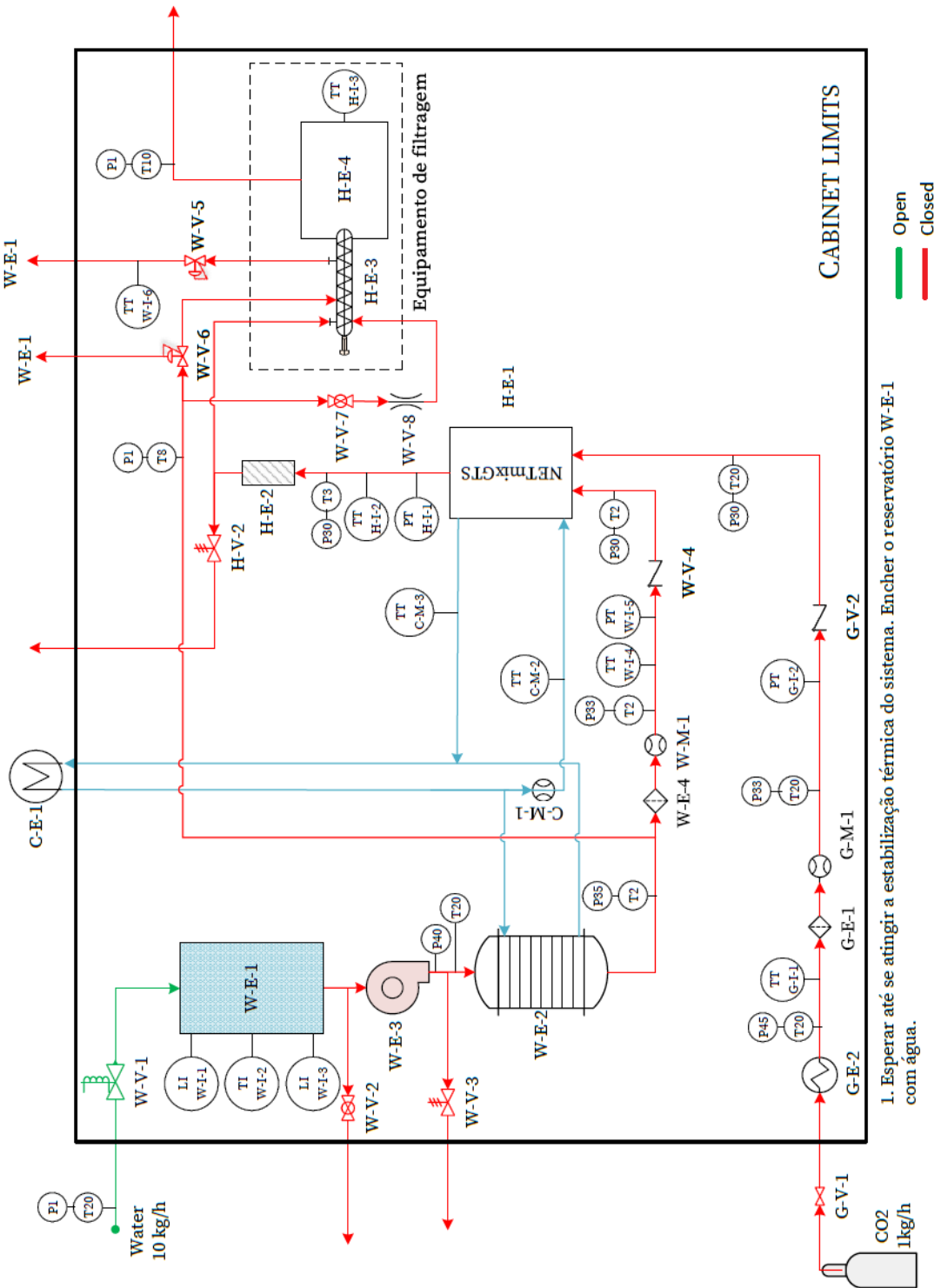


Figura 37 - Diagrama de blocos/processo 1.

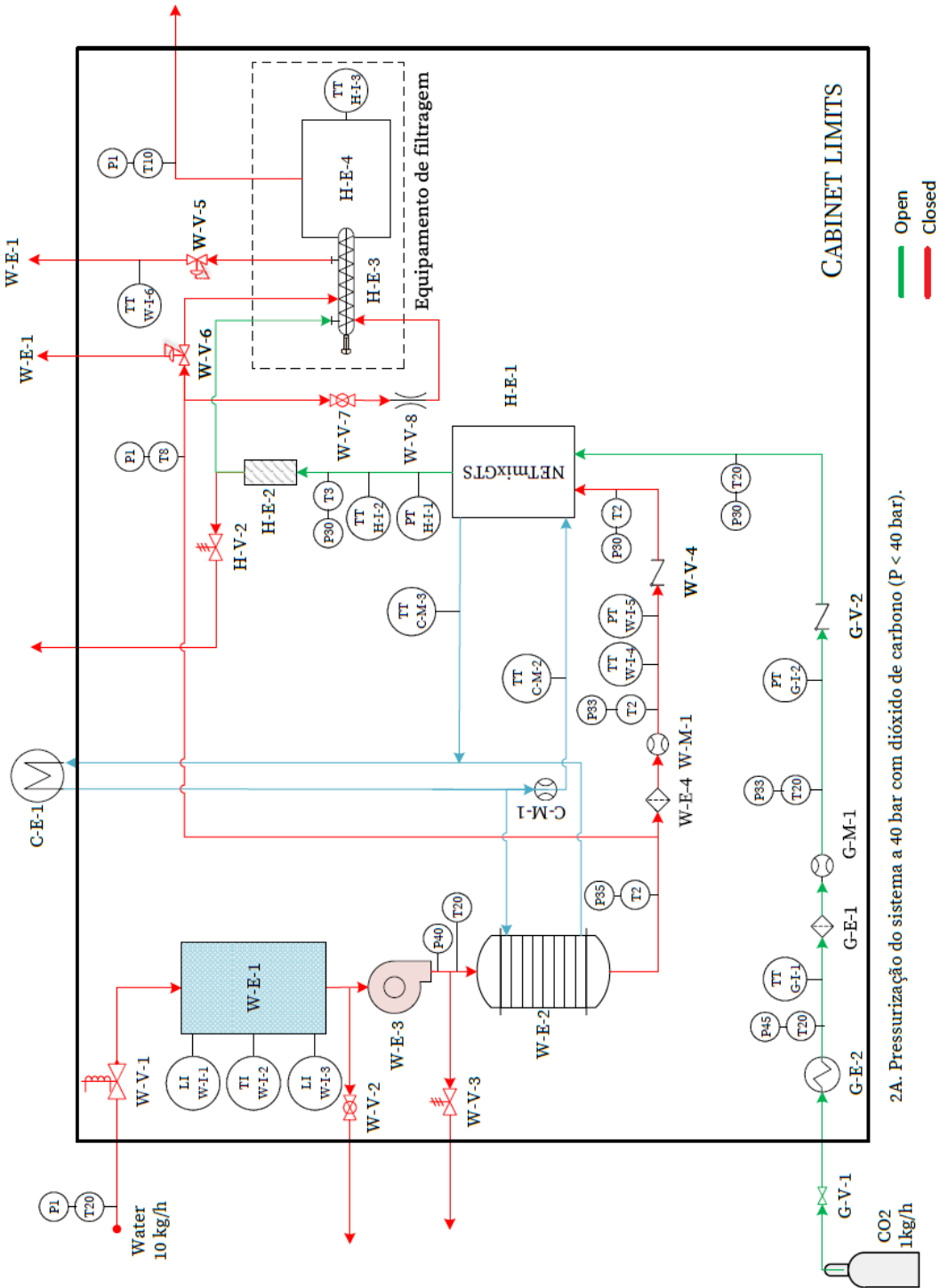


Figura 38 - Diagrama de blocos/processo 2.

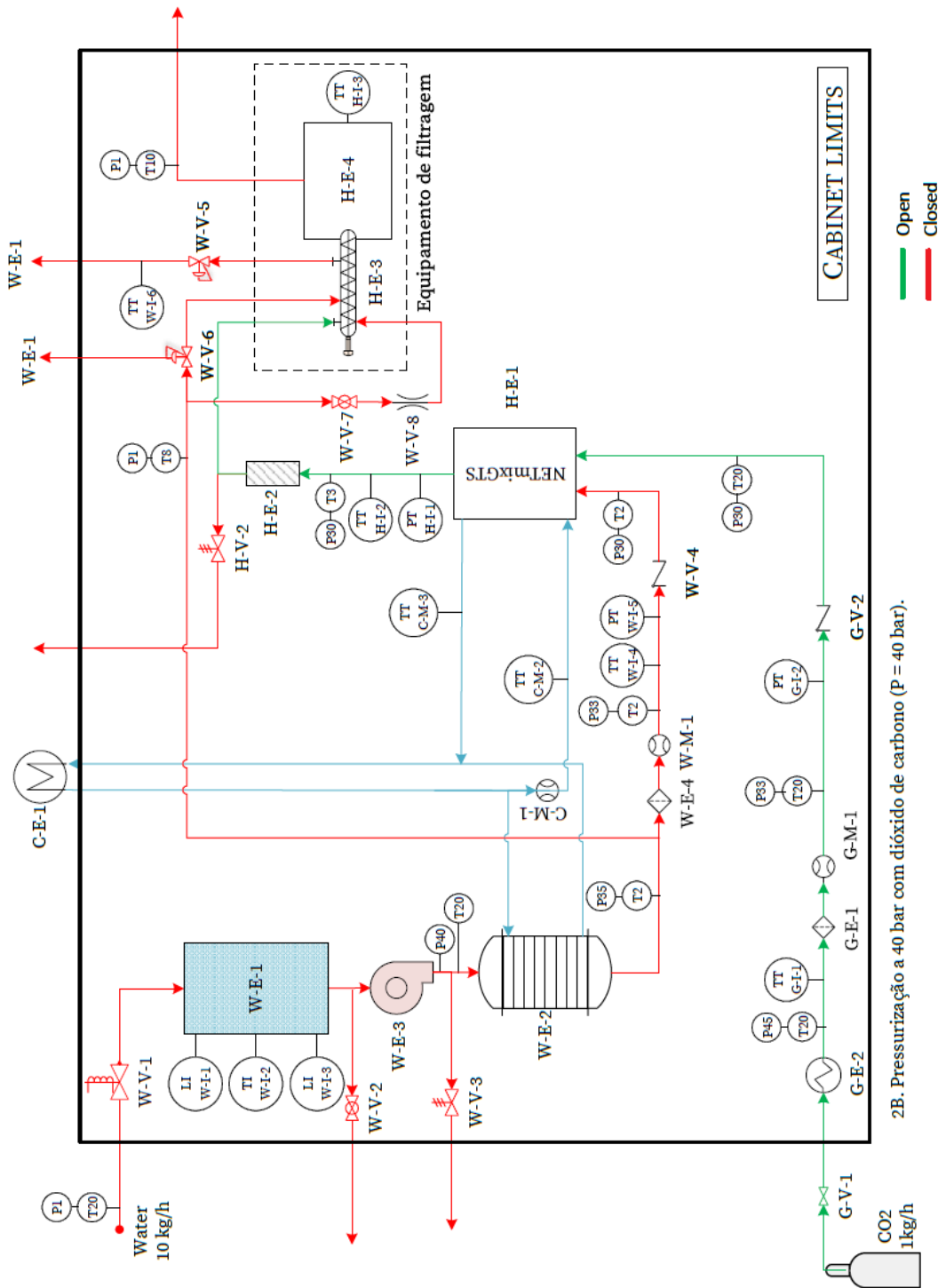


Figura 39 - Diagrama de blocos/processo 3.

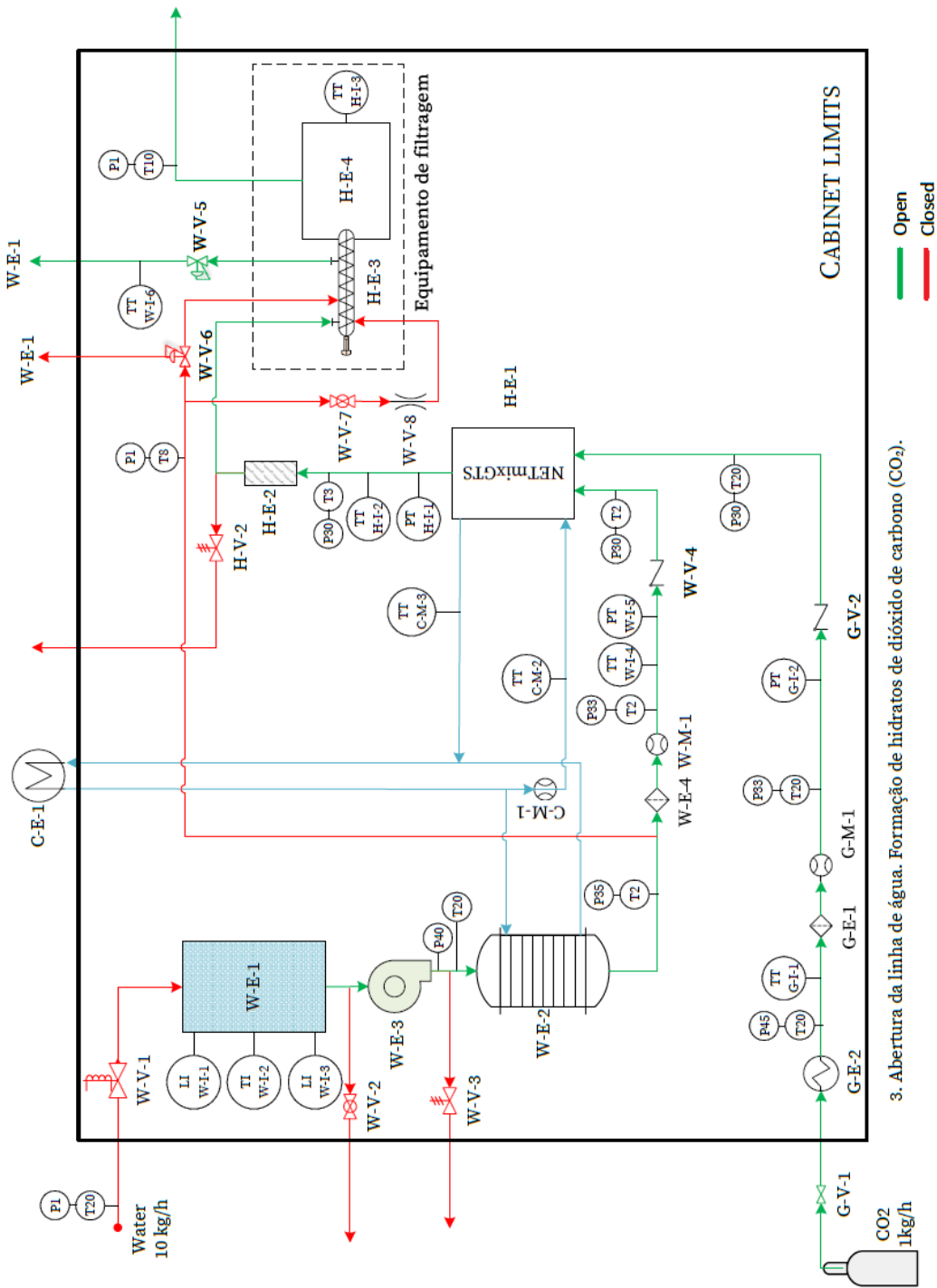


Figura 40 - Diagrama de blocos/processo 4.

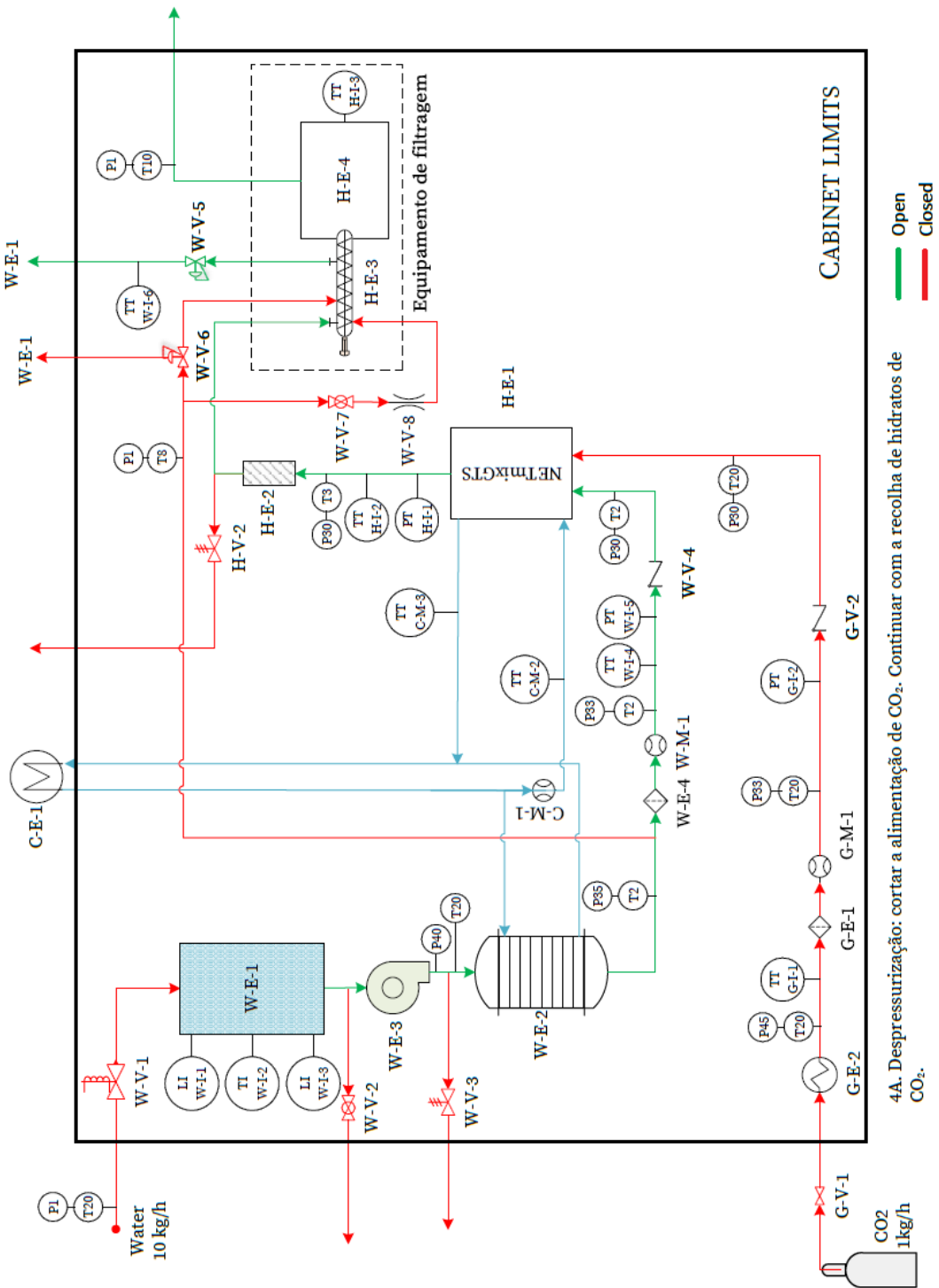


Figura 41 - Diagrama de blocos/processo 5.

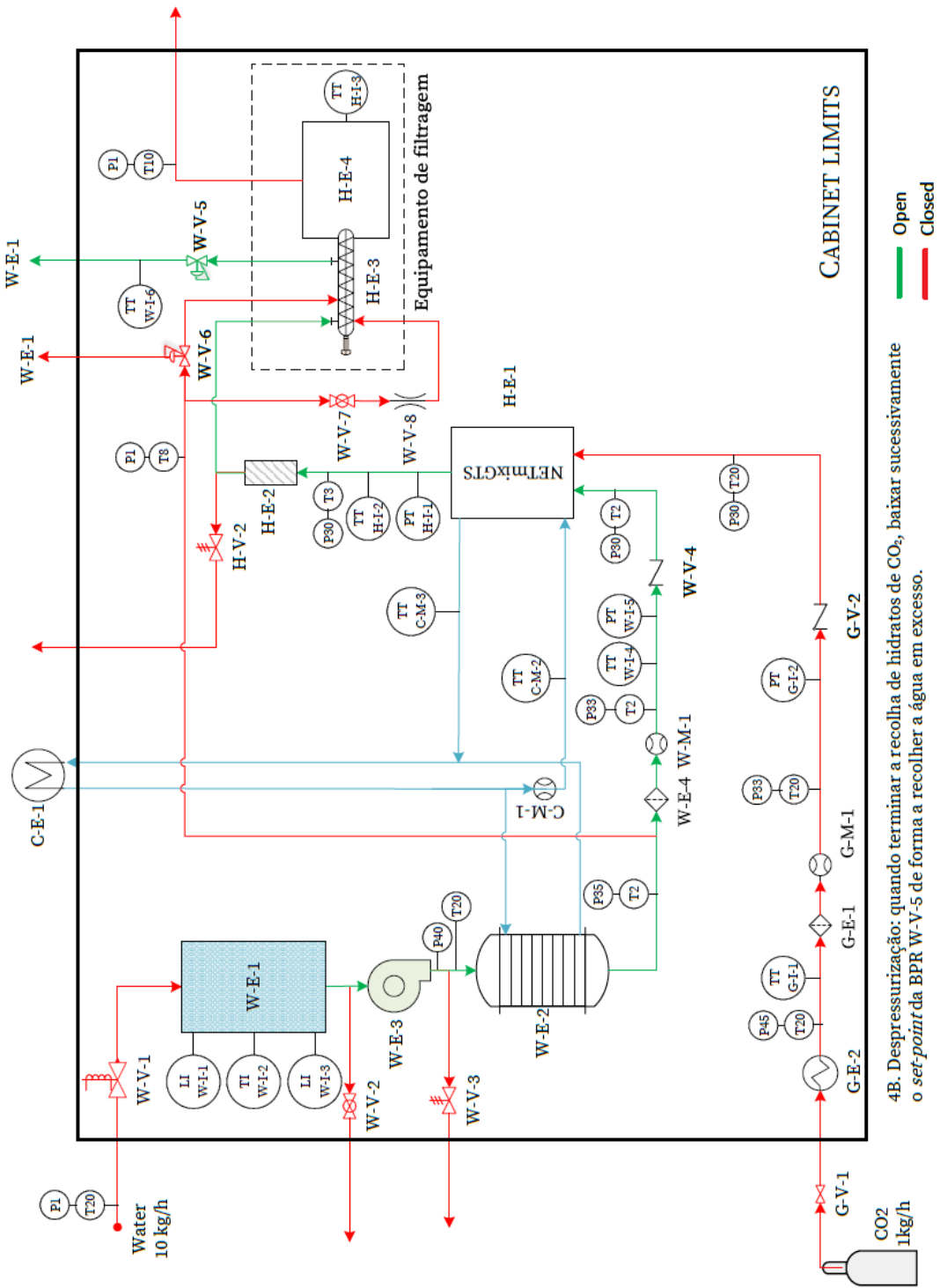


Figura 42 - Diagrama de blocos/processo 6.