

ESTADO 1: Entrada al compresor

$$P_1 = 101,3 \text{ [kPa]}$$

$$T_1 = 298 \text{ [K]}$$

$$h_1 = h \text{ ['Hydrogen' ; } T = T_1 ; P = P_1 \text{]}$$

$$s_1 = s \text{ ['Hydrogen' ; } T = T_1 ; P = P_1 \text{]}$$

ESTADO 2: Salida del compresor y entrada intercambiador

$$T_2 = 298 \text{ [K]}$$

$$P_2 = 10130 \text{ [kPa]}$$

$$h_2 = h \left[\text{'Hydrogen'} ; T = T_2 ; P = P_2 \right]$$

$$s_2 = s \left[\text{'Hydrogen'} ; T = T_2 ; P = P_2 \right]$$

ESTADO 3: Salida del intercambiador y entrada válvula de expansión

$$P_3 = 10130 \text{ [kPa]}$$

$$\varepsilon = 0,95$$

$$h_3 = h_2 - \varepsilon \cdot [h_1 - h_5]$$

$$s_3 = s \left[\text{'Hydrogen'} ; T = T_3 ; P = P_3 \right]$$

$$T_3 = T \left[\text{'Hydrogen'} ; h = h_3 ; P = P_3 \right]$$

ESTADO 4: Salida de la válvula de expansión y entrada al depósito

$$P_4 = 101,3 \text{ [kPa]}$$

$$h_4 = h_3$$

$$s_4 = s \left[\text{'Hydrogen'} ; T = T_4 ; x = 1 - y \right]$$

$$T_4 = T_5$$

PRODUCCIÓN:

$$\varepsilon_C = 0,9$$

$$h_f = \text{Enthalpy}_{\text{fusion}} \left[\text{'Hydrogen'} \right]$$

$$y = \frac{\varepsilon_C \cdot [h_2 - h_1]}{h_1 - h_f}$$

ESTADO 5: Salida de vapor del depósito para recomprimir

$$T_5 = T \left[\text{'Hydrogen'} ; h = h_5 ; P = P_5 \right]$$

$$P_5 = 101,3 \text{ [kPa]}$$

$$h_5 = h \left[\text{'Hydrogen'} ; x = 1 ; P = P_5 \right]$$

$$s_5 = s \left[\text{'Hydrogen'} ; x = 1 ; T = T_5 \right]$$

$$\text{COP} = \frac{h_2 - h_1}{T_1 \cdot [s_1 - s_2] - [h_2 - h_1]}$$

$$T_1 = T_1$$

$$T_2 = T_2$$

$$T_3 = T_3$$

$$T_4 = T_4$$

$$T_5 = T_5$$

$$T_6 = T_1$$

$$s_1 = s_1$$

$$s_2 = s_2$$

$$s_3 = s_3$$

$$s_4 = s_4$$

$$s_5 = s_5$$

$$s_6 = s_1$$

SOLUTION

Unit Settings: [kJ]/[K]/[kPa]/[kg]/[degrees]

$$\text{COP} = 0,009151$$

$$\varepsilon_C = 0,9$$

$$h_2 = 4249 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_4 = 942,4 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_f = 59,53 \text{ [kJ/kg]}$$

$$P_2 = 10130 \text{ [kPa]}$$

$$P_4 = 101,3 \text{ [kPa]}$$

$$s_1 = 70,41 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$s_3 = 29,58 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$s_5 = 39,07 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$s_1 = 70,41 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$s_3 = 29,58 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\varepsilon = 0,95$$

$$h_1 = 4198 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_3 = 942,4 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_5 = 716,8 \text{ [kJ/kg]}$$

$$P_1 = 101,3 \text{ [kPa]}$$

$$P_3 = 10130 \text{ [kPa]}$$

$$P_5 = 101,3 \text{ [kPa]}$$

$$s_2 = 51,34 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$s_4 = 38,82 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$s_6 = 70,41 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$s_2 = 51,34 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$s_4 = 38,82 \text{ [kJ/kg]}$$

$$s_5 = 39,07 \text{ [kJ/kg]}$$

$$T_2 = 298 \text{ [K]}$$

$$T_4 = 20,39 \text{ [K]}$$

$$T_6 = 298 \text{ [K]}$$

$$T_2 = 298 \text{ [K]}$$

$$T_4 = 20,39 \text{ [K]}$$

$$y = 0,01121$$

$$T_1 = 298 \text{ [K]}$$

$$T_3 = 63,73 \text{ [K]}$$

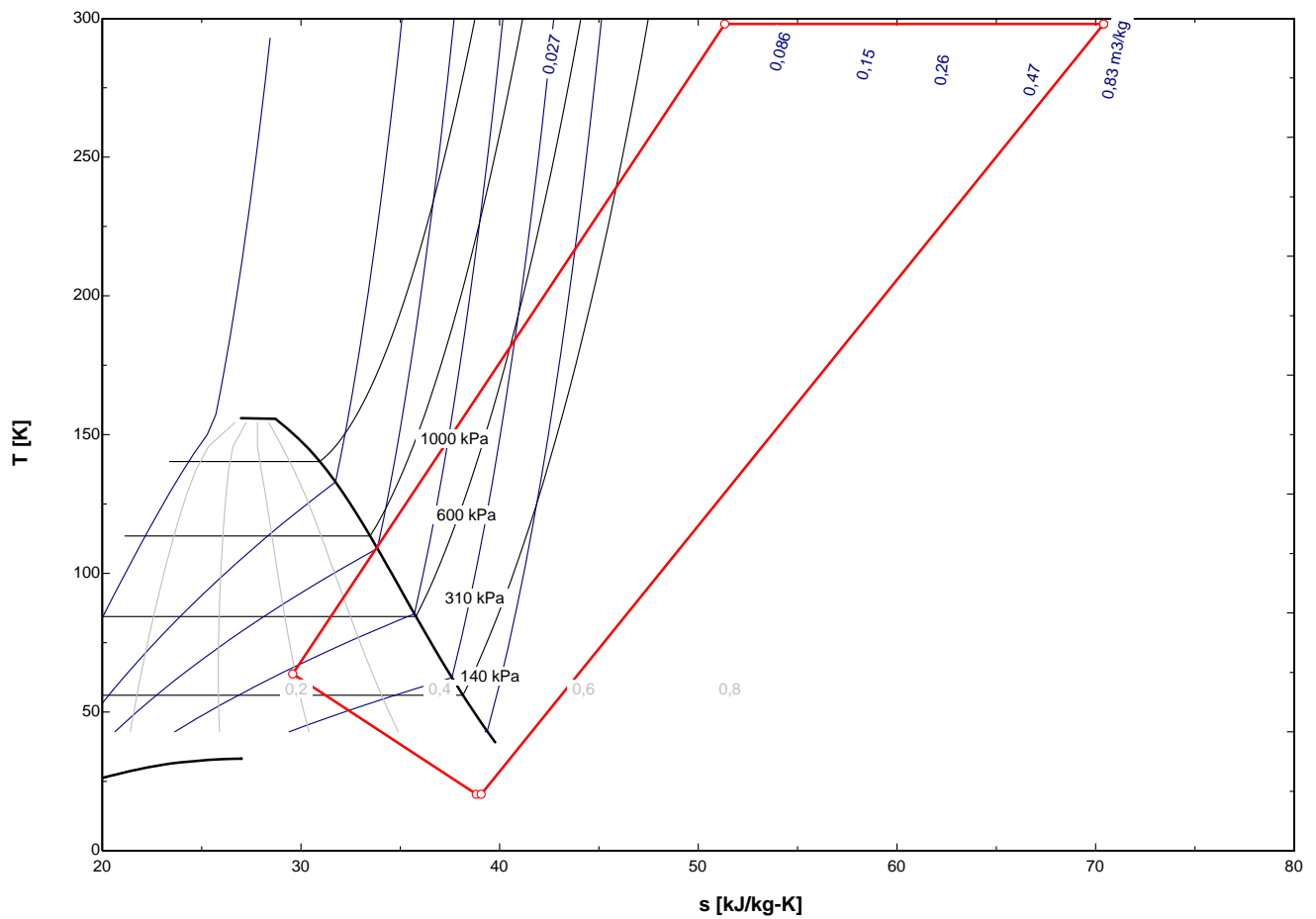
$$T_5 = 20,39 \text{ [K]}$$

$$T_1 = 298 \text{ [K]}$$

$$T_3 = 63,73 \text{ [K]}$$

$$T_5 = 20,39 \text{ [K]}$$

Hydrogen



Modelado de un ciclo Linde ideal, utiliza nitrógeno para preenfriar y expandir mediante una válvula J-T para la licuefacción de Hidrógeno.

Para un flujo de 1 mol/s de n-H₂ a través del compresor, asumiendo que no hay intercambio de calor con el medio.

Estado 0: Entrada del hidrógeno al compresor. Etapa de obtención y acondicionamiento.

$$T_0 = \text{ConvertTemp} [C; K; 20]$$

$$P_0 = 1 \text{ [atm]} \cdot \left| 101325 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{atm}} \right|$$

$$h_0 = h ['Hydrogen'; T = T_0; P = P_0]$$

$$s_0 = s ['Hydrogen'; T = T_0; P = P_0]$$

Estado 1: El hidrógeno entra en condiciones T₁ y P₁, después de una etapa de obtención y acondicionamiento.

H₂

$$T_1 = \text{ConvertTemp} [C; K; 20]$$

$$P_1 = 100 \text{ [atm]} \cdot \left| 101325 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{atm}} \right|$$

$$h_1 = h ['Hydrogen'; T = T_1; P = P_1]$$

$$s_1 = s ['Hydrogen'; T = T_1; P = P_1]$$

$$\dot{m} = 1 \text{ [kg/s]}$$

$$\dot{m} \cdot h_3 = (\dot{m} - \dot{m}_f) \cdot h_4 + \dot{m}_f \cdot h_f$$

Estado 2:

$$P_2 = 100 \text{ [atm]} \cdot \left| 101325 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{atm}} \right|$$

$$T_2 = 64 \text{ [K]}$$

$$h_2 = h ['Hydrogen'; T = T_2; P = P_2]$$

$$s_2 = s ['Hydrogen'; T = T_2; P = P_2]$$

Estado 3: Salida del intercambiador inundado de N₂

Fluido de trabajo : H₂

$$T_3 = T ['Hydrogen'; P = P_3; h = h_3]$$

$$P_3 = 100 \text{ [atm]} \cdot \left| 101325 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{atm}} \right|$$

$$s_3 = s ['Hydrogen'; T = T_3; P = P_3]$$

$$h_3 = h_2 - \epsilon_{N2} \cdot [h_{out,N2} - h_{in,N2}]$$

$$\epsilon_{N2} = 0,99$$

Proceso 3-4 : intercambio isoterma en intercambiador a contraflujo

Estado 4:

$$T_4 = T \left[\text{'Hydrogen'} ; P = P_4 ; h = h_4 \right]$$

$$P_4 = 1 \text{ [atm]} \cdot \left| 101325 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{atm}} \right|$$

$$h_4 = h_3 - \varepsilon \cdot [h_5 - h_0]$$

$$s_4 = s \left[\text{'Hydrogen'} ; T = T_4 ; h = h_4 \right]$$

$$\varepsilon = 0,99$$

Estado 5: Retorno al grupo compresor.

$$T_5 = \text{ConvertTemp} [C ; K ; 15]$$

$$P_5 = 1 \text{ [atm]} \cdot \left| 101325 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{atm}} \right|$$

$$h_5 = h \left[\text{'Hydrogen'} ; T = T_5 ; P = P_5 \right]$$

$$s_5 = s \left[\text{'Hydrogen'} ; T = T_5 ; P = P_5 \right]$$

Estado 6: Intercambiador inundado de N₂, el hidrogeno a 293 K (20°C) provoca la evaporacion del N₂

Fluido de trabajo: N₂ liquido

$$T_6 = \text{ConvertTemp} [C ; K ; -209,15]$$

$$P_6 = 0,144 \text{ [atm]} \cdot \left| 101325 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{atm}} \right|$$

$$h_6 = h \left[\text{'Nitrogen'} ; T = T_6 ; P = P_6 \right]$$

Estado Nⁱⁿ₂ : Entrada de N₂ de reposicion

$$T_{in;N_2} = \text{ConvertTemp} [C ; K ; -185,15]$$

$$P_{in;N_2} = 3 \text{ [atm]} \cdot \left| 101325 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{atm}} \right|$$

$$h_{in;N_2} = h \left[\text{'Nitrogen'} ; T = T_{in;N_2} ; P = P_{in;N_2} \right]$$

Estado N^{out}₂ : salida de N₂ en forma gaseosa

$$T_{out;N_2} = \text{ConvertTemp} [C ; K ; 15,15]$$

$$P_{out;N_2} = 0,144 \text{ [atm]} \cdot \left| 101325 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{atm}} \right|$$

$$h_{out;N_2} = h \left[\text{'Nitrogen'} ; T = T_{out;N_2} ; P = P_{out;N_2} \right]$$

Estado 7: Intercambiador inundado de N₂, el hidrogeno a 293 K (20°C) provoca la evaporacion del N₂

Fluido de trabajo : N₂ en estado vapor

La entalpia que ha perdido el H₂ es la que ha ganado el N₂

Haciendo un balance de masas entre el intercambiador inundado, la valvula J_T y el deposito de liquido, se asume que del grupo de

compresion sale el H_2 sin perdida de calor: $\dot{m} \cdot h_3 = (\dot{m} - \dot{m}_f) \cdot h_4 + \dot{m}_f \cdot h_f$

$$y = \frac{h_4 - h_3}{h_4 - h_{fH2}}$$

donde

$$h_{fH2} = \text{Enthalpy}_{\text{fusion}} \left[\text{'Hydrogen'} \right]$$

$$h_{fN2} = \text{Enthalpy}_{\text{fusion}} \left[\text{'Nitrogen'} \right]$$

Y obtenemos los Kg de hidrogeno liquido por cada kilogramo de nitrogeno comprimido

Que cantidad de nitrogeno liquido se consume por cada litro producido de hidrogeno liquido? para obtenerlo se realiza un balance de

masas alrededor de los dos intercambiadores 'calientes' y del baño en nitrogeno liquido

$$h_1 + (z \cdot h_{fN2}) + (1-y) \cdot (h_4) = \text{-----} \rightarrow \text{PENDIENTE}$$

ANALISIS DE LOS DISTINTOS CAMINOS DE COMPRESIÓN

A) Compresión adiabatica reversible

$$W_{sA} = \dot{m} \cdot [h_0 - h_1] \quad \text{Valores reales, puesto que surgen de calculos directos con tablas JANAF}$$

B) Compresión adiabatica e isentrópica para un gas ideal

$$W_{sB} = \left[\frac{R_H \cdot T_0 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)} \right]$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

$$C_P = \text{Cp} \left[\text{'H2'} ; T = T_0 \right]$$

$$C_V = \text{Cv} \left[\text{'H2'} ; T = T_0 \right]$$

$$R_H = \frac{8.31434 \text{ [kJ/kmole-K]}}{\text{MolarMass} \left[\text{'H2'} \right]}$$

$$\text{Gas}_{\text{ideal}} = \text{isIdealGas} \left[\text{'H2'} \right]$$

B1) Utilizando valores reales:

$$W_{sB1} = \left[\frac{R_{\text{Hnoideal}} \cdot T_0 \cdot \gamma_{\text{noideal}}}{\gamma_{\text{noideal}} - 1} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\left(\frac{\gamma_{\text{noideal}} - 1}{\gamma_{\text{noideal}}} \right)} \right]$$

$$\gamma_{\text{noideal}} = \frac{C_{\text{Pnoideal}}}{C_{\text{Vnoideal}}}$$

$$C_{\text{Pnoideal}} = \text{Cp} \left[\text{'Hydrogen'} ; T = T_0 ; P = P_0 \right]$$

$$C_{Vnoideal} = C_v \left[\text{'Hydrogen'} ; T = T_0 ; P = P_0 \right]$$

$$R_{Hnoideal} = \frac{8.31434 \text{ [kJ/kmole-K]}}{\text{MolarMass} \left[\text{'Hydrogen'} \right]}$$

$$\phi = \frac{W_{sB1}}{W_{sB}}$$

C)Compresión reversible isoterma

$$W_{sC} = Q_{cDisipado} - [h_0 - h_1]$$

$$Q_{cDisipado} = T_0 \cdot [s_1 - s_0]$$

D)Compresión reversible isoterma para un gas ideal

$$W_{sD} = R_H \cdot \ln \left[\frac{P_1}{P_0} \right]$$

E)Compresión politrópica reversible

$n_E = 7 / 5$ n vale 7/5 para gases diatómicos y 5/3 para gases monoatómicos

$$W_{sE} = P_0 \cdot V_0 \cdot \left[\frac{n_E}{n_E - 1} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\left(\frac{n_E - 1}{n_E} \right)} \right]$$

$$V_0 = \frac{\dot{m}}{\rho_{h,2}}$$

$$\rho_{h,2} = \rho \left[\text{'Hydrogen'} ; T = T_0 ; P = P_0 \right]$$

$$s_1 = s_0$$

$$s_2 = s_1$$

$$s_3 = s_3$$

$$s_4 = s_4$$

$$s_5 = s_5$$

$$T_1 = T_0$$

$$T_2 = T_1$$

$$T_3 = T_3$$

$$T_4 = T_4$$

$$T_5 = T_5$$

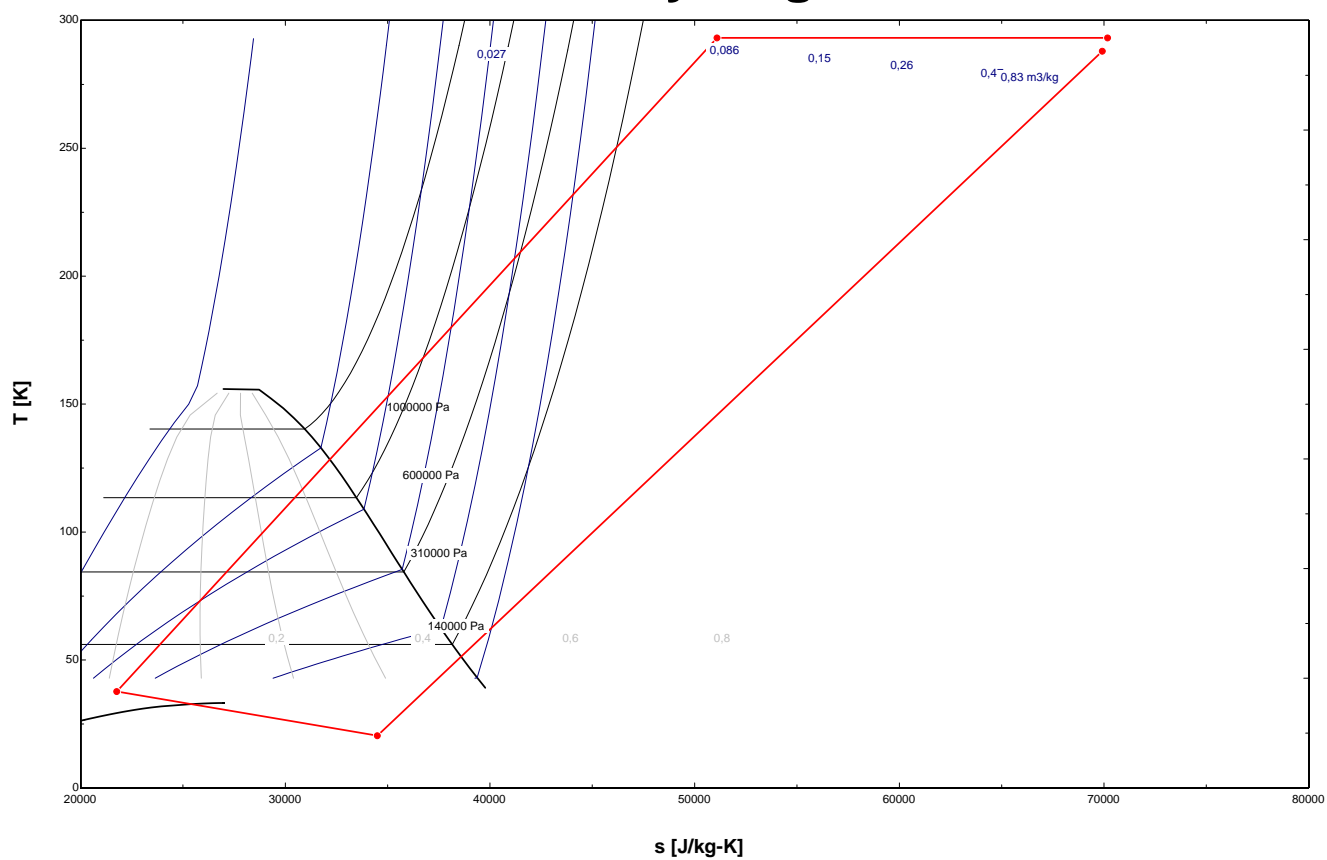
SOLUTION

Unit Settings: [J]/[K]/[Pa]/[kg]/[degrees]

$C_p = 14151$ [J/kg-K]
 $C_v = 10027$ [kJ/kg-K]
 $\varepsilon = 0,99$
 $\gamma = 1,411$
 $Gas_{ideal} = 1$
 $h_1 = 4,179E+06$ [J/kg]
 $h_3 = 551370$
 $h_5 = 4,057E+06$ [J/kg]
 $h_{fH2} = 59526$ [J/kg]
 $h_{in,N2} = -409267$ [J/kg]
 $\dot{m} = 1$ [kg/s]
 $\phi = 0,9927$
 $P_1 = 1,013E+07$ [Pa]
 $P_3 = 1,013E+07$ [Pa]
 $P_5 = 101325$ [Pa]
 $P_{in,N2} = 303975$ [Pa]
 $Q_{cDisipado} = -5,592E+06$
 $R_H = 4,124$
 $s_0 = 70174$ [J/kg-K]
 $s_2 = 29647$ [J/kg-K]
 $s_4 = 34393$ [J/kg-K]
 $T_0 = 293,2$ [K]
 $T_2 = 64$ [K]
 $T_4 = 20,39$ [K]
 $T_6 = 64$ [K]
 $T_{out,N2} = 288,3$ [K]
 $W_{SA} = -50316$ [J/kg]
 $W_{SB1} = -11643$ [J/kg]
 $W_{SD} = 18,99$ [kJ/kg]
 $y = 0,1256$ [kg H₂ / kg comprimido]

$C_{Pnoideal} = 14287$ [J/kg-K]
 $C_{Vnoideal} = 10161$ [J/kg-K]
 $\varepsilon_{N2} = 0,99$
 $\gamma_{noideal} = 1,406$
 $h_0 = 4,128E+06$ [J/kg]
 $h_2 = 946552$ [J/kg]
 $h_4 = 622041$
 $h_6 = -244098$ [J/kg]
 $h_{fN2} = 25345$ [J/kg]
 $h_{out,N2} = -10092$ [J/kg]
 $n_E = 1,4$
 $P_0 = 101325$ [Pa]
 $P_2 = 1,013E+07$
 $P_4 = 101325$ [Pa]
 $P_6 = 14591$ [Pa]
 $P_{out,N2} = 14591$ [Pa]
 $\rho_{h,2} = 0,08375$ [kg/m³]
 $R_{Hnoideal} = 4,124$
 $s_1 = 51098$ [J/kg-K]
 $s_3 = 21768$ [J/kg-K]
 $s_5 = 69928$ [J/kg-K]
 $T_1 = 293,2$ [K]
 $T_3 = 37,69$ [K]
 $T_5 = 288,2$ [K]
 $T_{in,N2} = 88$ [K]
 $V_0 = 11,94$ [m³]
 $W_{SB} = -11728$ [J/kg]
 $W_{SC} = -5,542E+06$ [J/kg]
 $W_{SE} = -1,154E+07$ [J/kg]

Hydrogen



El gas de Hidrógeno se licua utilizando un ciclo Claude ideal. El gas entra en un compresor reversible isoterma a 70 °F y a 1 atm. Se comprime a 40 atm.

El gas a alta presión se enfría en un intercambiador hasta los 324 °R.

En este punto el 50% del caudal másico se separa y se expande a través de un expansor isentrópico y adiabático hasta 1 atm.

El resto del fluido continua a través de dos intercambiadores más y se expande a través de una válvula de expansión hasta 1 atm.

Determinar la producción de líquido y el trabajo por masa licuada.

NOTA: Suponer que el trabajo de la expansión se utiliza en la compresión.

$$\dot{m} = 1 \text{ [kg/s]}$$

$$\dot{m}_T = 0,5 \cdot \dot{m}$$

$$h_f = \text{Enthalpy}_{\text{fusion}} \text{ ['Nitrogen']}$$

Se considera un rendimiento de los intercambiadores de 95%:

$$\varepsilon = 0,95$$

Estado 1 : Entrada del compresor

$$T_1 = \text{ConvertTemp} \text{ [F; K; 70]}$$

$$P_1 = 1 \text{ [atm]} \cdot \left| 101,325 \cdot \frac{\text{kPa}}{\text{atm}} \right|$$

$$h_1 = h \text{ ['Nitrogen'; T=T}_1 \text{; P=P}_1 \text{]}$$

$$s_1 = s \text{ ['Nitrogen'; T=T}_1 \text{; P=P}_1 \text{]}$$

Estado 2 : Salida del compresor y entrada intercambiador intermedio 1

$$T_2 = \text{ConvertTemp} \text{ [R; K; 324]}$$

$$P_2 = 40 \text{ [atm]} \cdot \left| 101,325 \cdot \frac{\text{kPa}}{\text{atm}} \right|$$

$$h_2 = h \text{ ['Nitrogen'; T=T}_2 \text{; P=P}_2 \text{]}$$

$$s_2 = s \text{ ['Nitrogen'; T=T}_2 \text{; P=P}_2 \text{]}$$

Estado 3 : Salida intercambiador intermedio 3; y entrada a turbina expansión 3T

$$T_3 = \text{ConvertTemp} \text{ [R; K; 324]}$$

$$P_3 = 40 \text{ [atm]} \cdot \left| 101,325 \cdot \frac{\text{kPa}}{\text{atm}} \right|$$

$$h_3 = h \text{ ['Nitrogen'; T=T}_3 \text{; P=P}_3 \text{]}$$

$$s_3 = s \text{ ['Nitrogen'; T=T}_3 \text{; P=P}_3 \text{]}$$

Estado 4: Entrada intercambiador intermedio 2

NOTA: El caudal másico es del 50%

$$T_4 = 273,15 + T \text{ ['Nitrogen'; h=h}_4 \text{; P=P}_4 \text{]}$$

$$P_4 = 40 \text{ [atm]} \cdot \left| 101,325 \cdot \frac{\text{kPa}}{\text{atm}} \right|$$

$$s_4 = s \left[\text{'Nitrogen'} ; T = T_4 ; P = P_4 \right]$$

Estado 5 : Salida de los intercambiadores y entrada de válvula de expansión

$$T_5 = 273,15 + T \left[\text{'Nitrogen'} ; h = h_6 ; P = P_5 \right]$$

$$P_5 = 40 \text{ [atm]} \cdot \left| 101,325 \cdot \frac{\text{kPa}}{\text{atm}} \right|$$

$$s_5 = s \left[\text{'Nitrogen'} ; h = h_6 ; P = P_5 \right]$$

Estado 6: Salida de válvula de expansión

Temperatura igual que estado 5

$$P_6 = 1 \text{ [atm]} \cdot \left| 101,325 \cdot \frac{\text{kPa}}{\text{atm}} \right|$$

$$T_6 = 273,15 + T \left[\text{'Nitrogen'} ; x = 0 ; P = P_6 \right]$$

$$h_6 = h \left[\text{'Nitrogen'} ; P = P_6 ; x = 0 \right]$$

$$s_6 = s \left[\text{'Nitrogen'} ; x = 0 ; P = P_6 \right]$$

Estado 7_T: Salida de la turbina siguiendo un proceso isentrópico

$$T_7 = 273,15 + T \left[\text{'Nitrogen'} ; s = s_3 ; P = P_7 \right]$$

$$P_7 = 1 \text{ [atm]} \cdot \left| 101,325 \cdot \frac{\text{kPa}}{\text{atm}} \right|$$

$$h_7 = h \left[\text{'Nitrogen'} ; T = T_7 ; P = P_7 \right]$$

$$s_7 = s_3$$

Estado 8 : Entrada intercambiador 1

$$T_8 = T \left[\text{'Nitrogen'} ; h = h_8 ; P = P_8 \right]$$

$$P_8 = 1 \text{ [atm]} \cdot \left| 101,325 \cdot \frac{\text{kPa}}{\text{atm}} \right|$$

$$s_8 = s \left[\text{'Nitrogen'} ; T = T_8 ; P = P_8 \right]$$

Para el intercambiador 1:

$$h_8 = h_1 - \varepsilon \cdot [h_3 - h_2]$$

Para el intercambiador 2:

$$h_4 = h_3 - \varepsilon \cdot [h_8 - h_7]$$

Para el intercambiador 3:

$$h_5 = h_4 - \varepsilon \cdot [h_7 - h_6]$$

IMPORTANTE : Trabajo de expansión generado por la turbina:

$$w_T = \dot{m}_T \cdot [h_3 - h_7]$$

Trabajo interno realizado por la válvula de expansión:

$$w_e = [1 - \dot{m}_T] \cdot [h_5 - h_6]$$

la producción resulta:

$$x = 0,5 \cdot \dot{m}$$

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + x \cdot \left[\frac{h_3 - h_7}{h_f - h_1} \right]$$

$$w = T_1 \cdot [s_1 - s_2] - [h_1 - h_2] - x \cdot w_T$$

$$T_1 = \text{ConvertTemp} [K; C; T_1]$$

$$T_2 = \text{ConvertTemp} [K; C; T_2]$$

$$T_3 = \text{ConvertTemp} [K; C; T_3]$$

$$T_4 = \text{ConvertTemp} [K; C; T_4]$$

$$T_5 = \text{ConvertTemp} [K; C; T_5]$$

$$T_6 = \text{ConvertTemp} [K; C; T_6]$$

$$T_7 = \text{ConvertTemp} [K; C; T_7]$$

$$T_8 = \text{ConvertTemp} [K; C; T_8]$$

$$T_9 = \text{ConvertTemp} [K; C; T_1]$$

$$s_1 = s_1$$

$$s_2 = s_2$$

$$s_3 = s_3$$

$$s_4 = s_4$$

$$s_5 = s_5$$

$$s_6 = s_6$$

$$s_7 = s_7$$

$$s_8 = s_8$$

$$s_9 = s_1$$

SOLUTION

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]

$$\varepsilon = 0,95$$

$$h_2 = 159,5 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_1 = 283 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_3 = 159,5 \text{ [kJ/kg]}$$

$h_4 = 21,83$ [kJ/kg]	$h_5 = -519,3$ [kJ/kg]
$h_6 = -431,5$ [kJ/kg]	$h_7 = 138,1$ [kJ/kg]
$h_8 = 283$ [kJ/kg]	$h_f = 25,35$ [kJ/kg]
$\dot{m} = 1$ [kg/s]	$\dot{m}_T = 0,5$ [kg/s]
$P_1 = 101,3$ [kPa]	$P_2 = 4053$ [kPa]
$P_3 = 4053$ [kPa]	$P_4 = 4053$ [kPa]
$P_5 = 4053$ [kPa]	$P_6 = 101,3$ [kPa]
$P_7 = 101,3$ [kPa]	$P_8 = 101,3$ [kPa]
$s_1 = 0,675$ [kJ/kg-K]	$s_2 = -0,6676$ [kJ/kg-K]
$s_3 = -0,6676$ [kJ/kg-K]	$s_4 = -0,3669$ [kJ/kg-K]
$s_5 = -4,066$ [kJ/kg-K]	$s_6 = -4,003$ [kJ/kg-K]
$s_7 = -0,6676$ [kJ/kg-K]	$s_8 = 0,675$ [kJ/kg-K]
$T_1 = 294,3$ [K]	$T_2 = 180$ [K]
$T_3 = 180$ [K]	$T_4 = 325,7$ [K]
$T_5 = 75,96$ [K]	$T_6 = 77,35$ [K]
$T_7 = 157,3$ [K]	$T_8 = 294,3$ [K]
$w = 266,2$ [kW/kg]	$w_e = -43,89$ [kW/kg]
$w_T = 10,72$ [kW/kg]	$x = 0,5$ [kg/s]
$y = 0,4377$	

INSTALACIÓN CRIOGÉNICA DE BAJA CAPACIDAD

INFORME DEL PROYECTO DE FIN DE CARRERA 1

Abraham Fernández Del Rey

Ingeniería Técnica Industrial Esp. Mecánica

1. OBJETIVO

El objetivo del presente proyecto es elaborar una instalación de frío que trabaja en los rangos de temperatura más alejados de los valores convencionales. Su función en un planteamiento inicial es licuar gases permanentes. Pero su objetivo principal, y el que no debe perderse de vista es el de desarrollar una instalación criogénica de baja capacidad a un mínimo coste.

Con este objetivo en el punto de mira, buscaremos el acercar los materiales y elementos más convencionales a las temperaturas de fusión de los denominados “gases permanentes”. Para ello tendremos que ser muy cuidadoso, pues todas las propiedades que a temperatura ambiente nos son familiares, comienzan a tener matices. Tanto en propiedades de fluidos, como de sólidos. (Problemas de adsorción, fatiga.....)

Merece una mención especial las propiedades de transmisión de calor y la formulación de las leyes que lo rigen.

Uno de los puntos más delicados, y enlazado con el siguiente, será la elección de la técnica. Todas las técnicas que conocemos actualmente, y nos son convencionales, resultan de largo insuficientes para los objetivos que perseguimos. Realizaremos un pequeño estudio de todas ellas y justificaremos la elección.

También explotar al máximo las cualidades de los sistemas y técnicas de producción, pues también hemos de optimizar el sistema energéticamente.

Con todo lo anteriormente mencionado, se obtendrá una pequeña instalación, ejecutable en la medida de lo posible y limitada solo por la falta de experimentación en ella. Y como se dice al comienzo de esta explicación, a un coste mínimo.

2. MOTIVACIÓN

En la actualidad, puede dar la sensación de estar todo descubierto en ciertas áreas técnicas. El motivo de este proyecto es mostrar un área de la termotecnia muy desconocida y poco extendida.

Rara es la facultad en la que se muestra, siquiera por encima, alguna pincelada de esta ingeniería sin mercado, la ingeniería criogénica.

Con la revolución del hidrogeno cada vez más cerca, la necesidad de ingenieros con conocimientos capaces de licuar gases permanentes se hace patente.

Se debe tener presente que es una rama de la mecánica, surgida hace (relativamente) muy poco del laboratorio. No es objeto de este proyecto, colmar las páginas de numerosos estudios y formulas, sino ejecutar una instalación concreta que represente una aplicación criogénica de forma austera sin dejar de lado el estado del arte.

Con las posibilidades existentes ahora mismo en el mercado, se buscará llegar a ejecutar la instalación, ya que el fin máximo es ese, obtener una aplicación real que facilite la comprensión, aprendizaje y desarrollo de las técnicas criogénicas disponibles en la actualidad.

3. ORDENES DE MAGNITUD

A la hora de ejecutar una instalación de producción de frío, la elección del refrigerante suele venir determinado por la aplicación. Según las condiciones de temperatura en el evaporador y condensador, y las presiones de trabajo, así se elige un refrigerante u otro.

¿Hasta dónde se puede llegar, en órdenes de temperatura, utilizando ciclos de compresión?

Se comenzara explicando, sin entrar en mucha profundidad los siguientes conceptos:

Punto triple, es el punto en el diagrama de fase, en el que pueden coexistir los estados sólido, líquido y gaseoso en equilibrio.

Viene definido por una temperatura y una presión de vapor.

La **presión de vapor** (o presión de saturación) es la presión a una temperatura dada, en la que podemos encontrar en equilibrio líquido y vapor. Es una propiedad intensiva, es decir, es independiente de la masa, mientras ambas se encuentren en equilibrio (sistema cerrado).

El **punto crítico**, es aquel en el que ¿la densidad de liquido y vapor se iguala?. La sustancia se encuentra por encima de la temperatura crítica y presión critica.

Un **fluido supercrítico** tiene propiedades “híbridas” entre un liquido y un gas. Se difunde como un gas, es decir, tiene la tendencia a ocupar todo el volumen de su continente. Capacidad de disolución como un líquido.

La **densidad** de una sustancia, está íntimamente ligada a la temperatura y la presión de dicha sustancia. Si bien la tendencia es que al aumentar la presión, aumenta la densidad y al aumentar la temperatura la densidad decrece, hay excepciones.

Pequeños cambios de presión y temperaturas supercríticas, producen grandes cambios de densidad.

Cuando se produce un cambio de estado, este va asociado a un cambio brusco de entalpia y densidad. Por encima del punto crítico, no se produce. Es decir, aumenta la presión pero no se da cambio de estado. No hay licuefacción al presurizar, ni evaporación al calentar.

En resumen:

- No existe interfase gas-liquido
- La compresibilidad isoterma, es infinitamente positiva.
- El coeficiente de expansión térmica es infinito y positivo.
- La entalpia de vaporización es 0.

Si la densidad se mantiene constante e igual a la densidad critica, la capacidad calorífica a volumen constante tiende a infinito.

La densidad por encima del punto crítico, depende de la presión y temperatura, pero realmente es más cercana a los líquidos que a los gases. (La densidad aumenta si lo hace la presión a temperatura constante).

La viscosidad es mucho más baja que la de los líquidos, lo hidrodinámicamente es favorable.

Alta penetrabilidad a través sólidos porosos.

Mayores coeficiente de difusión que en líquidos, por lo que la transferencia de materia es más favorable.

La introducción de los conceptos punto triple y punto crítico, viene motivada porque son los limitantes en la utilización de gases para la producción de frío a temperaturas criogénicas.

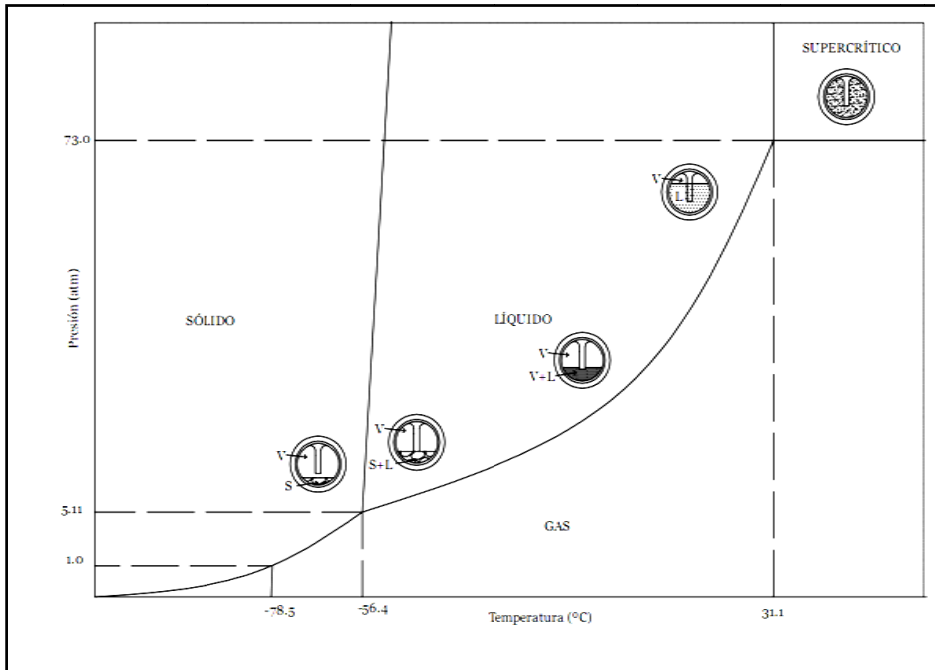


Ilustración 1. Diagrama de Fase y estados según zona

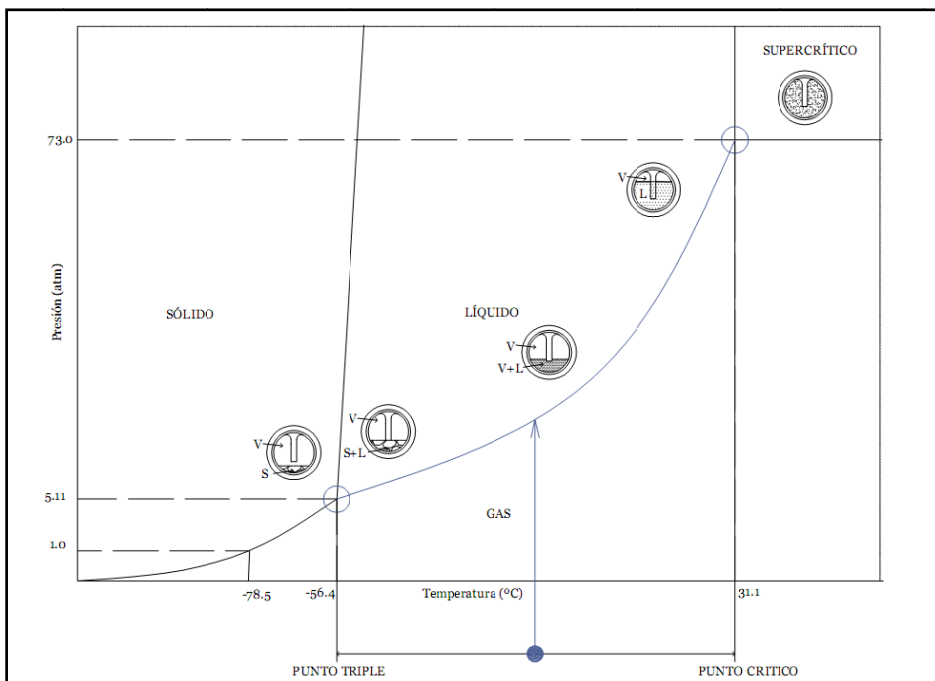


Ilustración 2. Región de trabajo posible de acuerdo a las limitaciones expresadas

TEMPERATURAS DE TRABAJO POR REFRIGERANTE

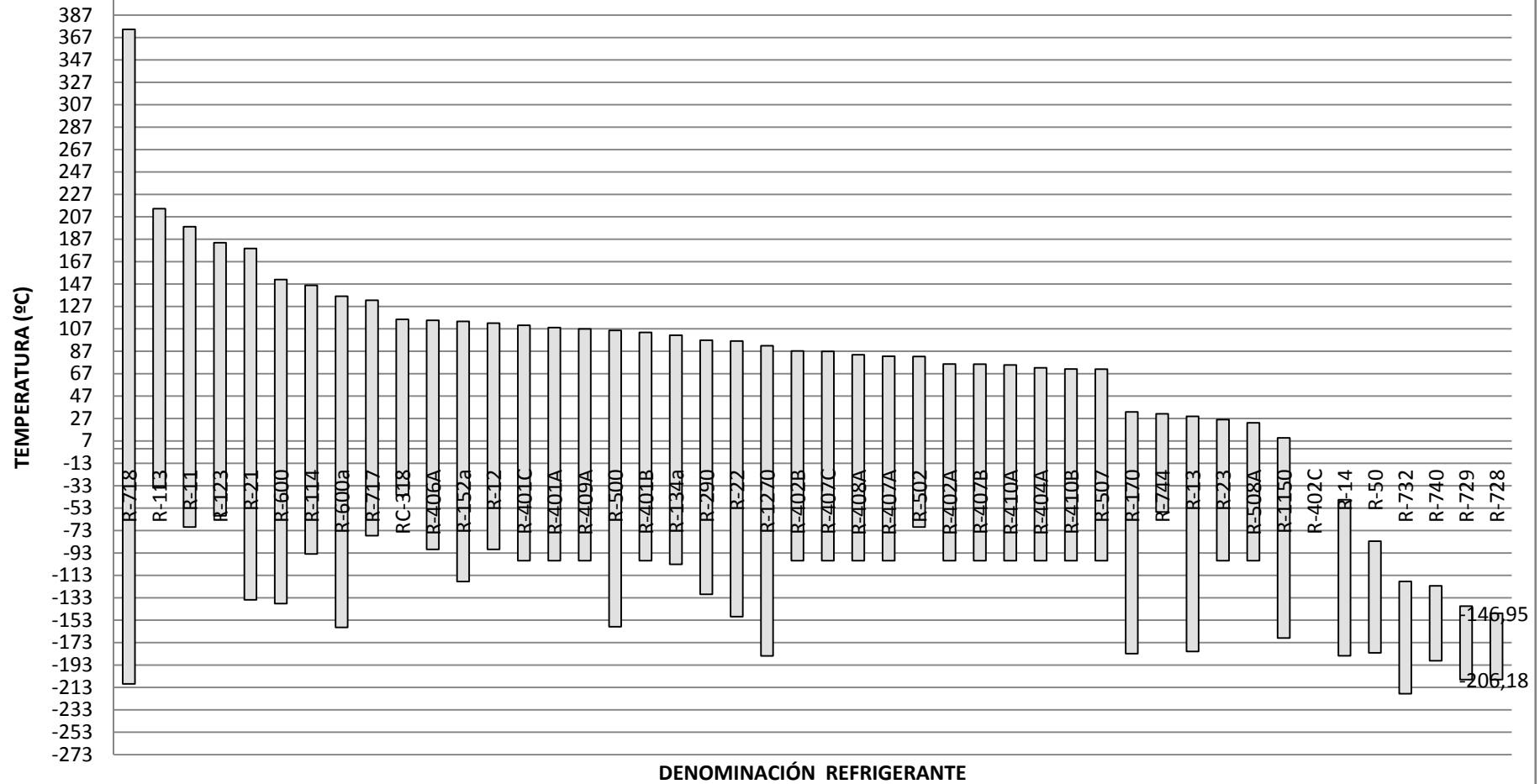


Gráfico 1. Ordenes de magnitud de refrigerantes según temperatura

REFRIGERANTE	FORMULA	TEMP MIN (°C)	TEMP MIN (K)	TEMPERATURA CRITICA (°C)	TEMPERATURA CRITICA (K)	PRESION CRITICA	PRESION MAXIMA	PRESION MINIMA	APLICACIONES RECOMENDADAS
R-11	CCl ₃ F	-7,0	263,15	193,01	471,16	44,026	75	0,00575393	AIRES ACCNDICIONADOS DE EDIFICIOS
R-113	CCl ₂ FCClF ₂	-35	238,15	214,1	487,25	34,37	200	0,0198585	
R-114	CClF ₂ CClF ₂	-94	179,15	145,7	418,85	32,59	200	0,0020535	AIRES ACONDICIONADOS MARINOS Y AVIACION
R-1150	CH ₃ CH ₃	-159	104,15	9,5	282,65	50,75	300	0,00156211	
R-12	CCl ₂ F ₂	-90	183,15	112	385,15	41,576	75	0,0284233	AIRES ACCNDICIONADOS DE EDIFICIOS
R-123	CHCl ₂ CF ₃	-60	213,15	183,68	456,83	36,68	30	0,0092768	SUSTITUYE A R-11
R-1270	CH ₃ CHCH ₂	-135	88,15	91,75	364,9	46,13	200	1,77E-05	
R-13	CClF ₃	-181	92,15	28,8	301,95	38,65	200	4,27E-06	REFRIGERACION MUY BAJA TEMPERATURA
R-134a	CH ₂ FCF ₃	-103,3	169,85	101,1	374,25	40,67	75	0,00455144	SUSTITUYE A R-12
R-14	CF ₄	-184,9	88,25	-45,7	227,45	37,41	200	0,000830035	
R-152a	CH ₃ CHF ₂	-118,59	154,56	113,5	386,65	41,95	34	0,00156531	
R-170	CH ₃ CH ₃	-183	90,15	32,73	305,88	50,102	200	8,16E-06	
R-21	CHCl ₂ F	-135	138,15	178,5	451,65	51,63	25	1,87E-06	
R-22	CHCl ₂ F ₂	-130	123,15	96	369,15	49,774	300	2,43	AIRES ACCNDICIONADOS DE EDIFICIOS
R-23	CHF ₃	-100	173,15	25,9	299,95	48,3	100	0,317048	SUSTITUYE A R-13
R-290	CH ₃ CH ₂ CH ₃	-130	143,15	96,67	369,32	43,3593	75	0,00106495	
R-401A	R290 (50 %) + R152 (13 %) + R124 (34 %)	-100	173,15	108,01	381,16	46,038	60	0,00639567	
R-401B	R22 (61 %) + R152 (11 %) + R124 (28 %)	-100	173,15	103,68	376,83	46,4705	30	0,00735085	SUSTITUTO R-12 SEGÚN APLICACIÓN
R-401C	R22 (33 %) + R152 (15 %) + R124 (52 %)	-100	173,15	110,07	383,22	43,4812	25	0,00458756	
R-402A	R125 (50%) + R290 (2%) + R22 (38%)	-100	173,15	75,5	348,65	41,347	50	0,0298877	RECONVERSION APLICACIONES R-502
R-402B	R125 (38%) + R290 (2%) + R22 (60%)	-100	173,15	87,05	360,2	45,3154	35	0,0262054	RECONVERSION APLICACIONES R-502
R-402C	-	-100	173,15	273,15					
R-404A	R125 (44 %) - R143a (52 %) + R134a (4 %)	-100	173,15	72,07	345,22	37,315	40	0,0282034	SUSTITUTO R-502
R-406A	-	-90	183,15	114,49	387,64	45,81	30	0,0165175	
R-407A	R32 (20 %) + R125 (40 %) + R134a (40 %)	-100	173,15	82,36	355,51	45,3215	30	0,0136217	
R-407B	R32 (10 %) + R125 (70 %) + R134a (20 %)	-100	173,15	75,36	348,51	41,3029	30	0,0183222	
R-407C	R32 (23 %) + R125 (25 %) - R134a (52 %)	-100	173,15	86,74	359,89	46,191	55	0,0117622	SUSTITUYE A R-22
R-408A	R22 (44 %) + R143a (4 %) + R125 (52 %)	-100	173,15	83,68	356,83	43,4133	54	0,0266076	RECONVERSION APLICACIONES R-502
R-409A	R22 (60 %) + R124 (25 %) + R124b (15 %)	-100	173,15	106,8	379,95	46,2176	32	0,00707533	SUSTITUYE R-12 Y R-22 SEGÚN APLICACIÓN
R-410A	R32(50%) + R125 (50%)	-100	173,15	74,67	347,82	51,737	40	0,0436503	SUSTITUYE A R-22 Y R-13 SEGÚN APLICACIÓN
R-410B	R32(45%) + R125 (55%)	-100	173,15	71,03	344,10	47,795	40	0,0366010	
R-50	CH ₄	-182,2	90,55	-82,59	190,56	45,988	500	0,121507	
R-500	R12 (73,8%) + R152a(26,2%)	-159	114,15	105,5	378,65	44,23	200	4,22E-06	REFRIGERACION MEDIA TEMPERATURA
R-502	-	-70	203,15	80,2	355,35	40,818	75	0,275669	ALMACENAMIENTO ALIMENTOS A -18°C
R-507	R125 (50 %) + R143 (50 %)	-100	173,15	79,9	344,05	37,9356	27	0,0261172	SUSTITUTO R 502
R-508A	R23(46%) - R116b(54%)	-100	173,15	23	296,15	40,6	20	0,415618	
R-600	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	-138,29	134,86	150,8	423,95	37,181	50	2,28E-06	
R-600a	CH(CH ₃) ₃	-159,6	113,55	135,92	409,07	36,8455	50	3,19E-08	
R-717	NH ₃	-77,66	195,49	132,35	405,5	113,53	200	0,0608458	
R-718	H ₂ O	-210	93,15	374,14	647,29	220,89	1200	1,41E-08	
R-728	N ₂	-209,48	66,67	146,95	126,2	34	400	0,125362	
R-729	AIRE N2(76%)+O2(23%)+Ar(1%)	-205,18	66,67	-140,65	132,5	37,7436	300	0,0999715	
R-732	O ₂	-218,8	54,35	-118,57	154,58	50,429	500	0,00145846	
R-740	Ar	-189,3	83,65	-122,45	159,7	48,6492	500	0,691156	
R-744	CO ₂	-56,57	216,58	31,06	304,21	73,834	200	5,18168	
RC-318	C ₄ F ₈	-41,4	231,75	115,3	388,45	27,81	200	0,17763	

Tabla 1. Resumen de propiedades para refrigerantes comunes

4. INDICE

Capítulo 1: Descripción, objetivo y motivación

- 1.1. Objetivo
- 1.2. Motivación
- 1.3. Descripción

Capítulo 2: Baja temperatura

- 2.1. Nomenclatura y variables
- 2.2. Fundamentos
 - 2.2.1. Marco Histórico
 - 2.2.1.1. *Siglo XVII*
 - 2.2.1.2. *Siglo XVIII*
 - 2.2.1.3. *Siglo XIX*
 - 2.2.1.4. *Siglo XX*
 - 2.2.1.5. *Siglo XXI*
 - 2.2.2. Conceptos previos
 - 2.2.2.1. *Breve introducción a los fundamentos termodinámicos*
 - 2.2.2.2. *Sistemas termodinámicos*
 - 2.2.2.2.1. *Tipología de los sistemas termodinámicos*
 - 2.2.2.2.2. *Principios termodinámicos*
 - 2.2.2.2.2.1. *Principio cero de la termodinámica*
 - 2.2.2.2.2.2. *Primer principio de la termodinámica*
 - 2.2.2.2.2.3. *Segundo principio de la termodinámica*
 - 2.2.2.2.2.4. *Tercer principio de la termodinámica*
 - 2.2.2.2.3. *Propiedades de una sustancia pura, simple y compresible*
 - 2.2.2.2.3.1. *Principio de estado*
 - 2.2.2.2.3.2. *Relación p-v-T*
 - 2.2.2.2.3.3. *Diagramas de propiedades*
 - 2.2.3. Aplicaciones actuales
 - 2.2.3.1. *Aplicaciones espaciales*
 - 2.2.3.2. *Aplicaciones medicas*
 - 2.2.3.3. *Aplicaciones industriales*
 - 2.2.3.4. *Aplicaciones físicas y de investigación*
 - 2.2.4. Propiedades de las sustancias
 - 2.2.4.1. *Conceptos fundamentales*
 - 2.2.4.2. *Propiedades en líquidos y sólidos*
 - 2.2.4.3. *Propiedades en gases ideales*
 - 2.2.4.4. *Relaciones termodinámicas para sistemas de baja temperatura*
 - 2.2.4.4.1. *Expansión Joule - Thompson*
 - 2.2.4.5. *Fluidos criogénicos o Gases Permanentes*
 - 2.2.4.5.1. *Oxígeno*
 - 2.2.4.5.2. *Nitrógeno*

- 2.2.4.5.3. *Argón*
- 2.2.4.5.4. *Hidrogeno*
- 2.2.4.5.5. *Helio*
- 2.2.4.5.6. *Neón*
- 2.2.4.5.7. *Aire*
- 2.2.4.5.8. *Flúor*
- 2.2.4.5.9. *Metano*
- 2.2.4.6. *Refrigerantes criogénicos*
 - 2.2.4.6.1. *Freones tradicionales*
 - 2.2.4.6.2. *Freones criogénicos*

Capítulo 3: Transmisión de calor

- 3.1. Nomenclatura y variables
- 3.2. Propiedades de transferencia de calor en ámbito criogénico
 - 3.2.1. Calor específico
 - 3.2.1.1. *Gases*
 - 3.2.1.2. *Líquidos*
 - 3.2.1.3. *Sólidos*
 - 3.2.2. Conductividad
 - 3.2.2.1. *Gases*
 - 3.2.2.2. *Líquidos*
 - 3.2.2.3. *Sólidos*
 - 3.2.3. Conducción
 - 3.2.4. Convección
 - 3.2.5. Transferencia en flujos bifásicos
 - 3.2.6. Radiación
 - 3.2.7. Aislamiento criogénico
 - 3.2.7.1. *Expanded close-cell Foam (ECCF)*
 - 3.2.7.2. *Gas-filled Powders (GFP)*
 - 3.2.7.3. *Evacuated Powders (EP)*
 - 3.2.7.4. *Opacified Powder Insulation (OPI)*
 - 3.2.7.5. *Microsphere Insulation (MI)*
 - 3.2.7.6. *Multilayer insulation (MLI)*
 - 3.2.8. Intercambiadores de calor criogénicos
 - 3.2.8.1. *Tipología*
 - 3.2.8.1.1. *Intercambiadores tubulares*
 - 3.2.8.1.2. *Intercambiadores Giauque-Hampson*
 - 3.2.8.1.3. *Intercambiadores Plate-Fin*
 - 3.2.8.1.4. *Intercambiadores Perforated-Plate*
 - 3.2.8.1.5. *Intercambiadores de metales sinterizados*

3.2.8.2. Regeneradores

Capítulo 4: Propiedades en el ámbito criogénico

- 4.1. Nomenclatura y variables
- 4.2. Propiedades físicas y mecánicas
- 4.3. Flujo bifásico
- 4.4. Propiedades por debajo de 4K

Capítulo 5: Ciclos de producción de frío

- 5.1. Nomenclatura y variables
- 5.2. Ciclos de refrigeración estándar
 - 5.2.1. *Ciclo ideal de Carnot*
 - 5.2.2. *Ciclo real de compresión simple*
 - 5.2.3. *Variaciones sobre el ciclo simple*
 - 5.2.4. *Compresión múltiple*
 - 5.2.4.1. *Compresión múltiple con inyección directa*
 - 5.2.4.2. *Compresión múltiple con inyección indirecta*
 - 5.2.4.3. *Ciclo múltiple en cascada*
 - 5.2.5. *Otros ciclos de refrigeración estándar*
- 5.3. Ciclos de refrigeración criogénicos
 - 5.3.1. *Ciclos abiertos*
 - 5.3.1.1. *Expansión Joules-Thomson*
 - 5.3.2. *Ciclos cerrados*
 - 5.3.2.1. *Ciclo Claude*
 - 5.3.2.2. *Ciclo Claude Multietapa (Dual Pressure Claude)*
 - 5.3.2.3. *Ciclo Ficket-Jackobs*
 - 5.3.2.4. *Ciclo Gifford-McMahon*
 - 5.3.2.5. *Ciclo Hirn*
 - 5.3.2.6. *Ciclo Humpfrey*
 - 5.3.2.7. *Ciclo Siemens*
 - 5.3.2.8. *Ciclo Hampson-Linde*
 - 5.3.2.9. *Ciclo Linde Multietapa (Dual Pressure Linde Cycle)*
 - 5.3.2.10. *Ciclo Heylandt*
 - 5.3.2.11. *Ciclo Kleemenko*

Capítulo 6: Equipos tipo para la producción criogénica de baja capacidad

- 6.1. Equipos de producción de nitrógeno/oxígeno
- 6.2. Equipos de producción de metano
- 6.3. Equipos de producción de hidrógeno
- 6.4. Equipos de producción de helio (*)
- 6.5. Columnas de destilación

- 6.6. Coldbox de separación para aire
- 6.7. Almacenamiento
- 6.8. Valvulería

Capítulo 7: Calculo de cargas

- 7.1. Descripción del equipo
- 7.2. Calculo de flujo másico y cargas
- 7.3. Diseño preliminar y concepto
- 7.4. Dimensionado de los elementos de compresión
- 7.5. Dimensionado de los intercambiadores de calor
- 7.6. Dimensionado de los dispositivos de expansión
- 7.7. Dimensionado de las líneas de transferencia
- 7.8. Dimensionado del almacenaje
- 7.9. Descripción del sistema de control e instrumentación
- 7.10. Elementos de seguridad

Capítulo 8: Análisis energético

- 8.1. Comparativa de consumos según método
- 8.2. Coste energético y litro según tamaño de instalación
- 8.3. Optimización energética del sistema

Capítulo 9: Análisis económico

- 9.1. Inventario de componentes del sistema
- 9.2. Valoración económica del sistema

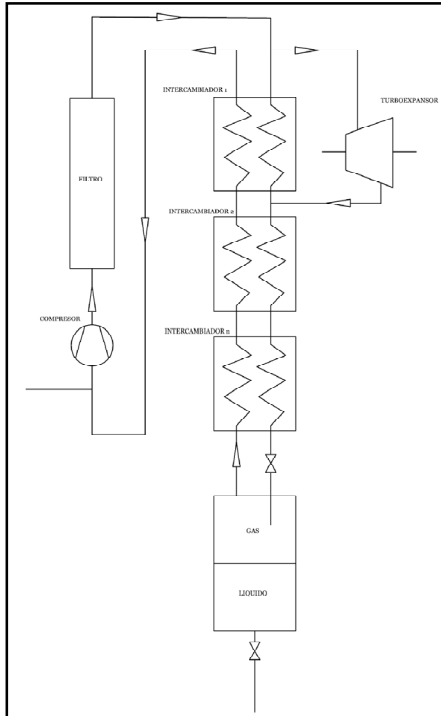
Capítulo 10: Conclusiones

Capítulo 11: Bibliografía

- 11.1. Principios básicos
- 11.2. Ingeniería Criogénica
- 11.3. Compresores criogénicos
- 11.4. Fluidos criogénicos
- 11.5. Expansores
- 11.6. Intercambio y transferencia de calor
- 11.7. Ingeniería fluido mecánica
- 11.8. Propiedades de materiales a baja temperatura
- 11.9. Instrumentación a baja temperatura
- 11.10. Líneas de transferencia
- 11.11. Flujo bifásico
- 11.12. Valvulería
- 11.13. Aislamiento
- 11.14. Compresores
- 11.15. Elementos mecánicos
 - 11.15.1. Rodamientos
 - 11.15.2. Juntas
 - 11.15.3. Lubricación
- 11.16. Seguridad
- 11.17. Artículos y Papers

5. DESCRIPCIÓN

La instalación que se lleva a cabo en este proyecto, es una instalación de baja capacidad enfocada a la licuefacción de gases permanentes. Se ha elegido el nitrógeno por ser el gas que marca la separación entre la refrigeración convencional y la criogénica.



En una primera parte del proyecto se revisa los conceptos de termodinámica y termotecnia. Como se comprobará a lo largo de estos primeros capítulos, las propiedades que se conocen y utilizan con normalidad en el ámbito de la refrigeración convencional, se vuelven extrañas y nuevas para el ámbito criogénico. Por lo tanto, se debe repasar los conceptos para diseñar una instalación de frío y contemplar las matizaciones necesarias.

En una segunda parte, se realiza el análisis de una instalación tipo. Existen sistemas criogénicos de multitud de tamaños. Para este proyecto se elige una instalación como las utilizadas por los pioneros de esta rama. Una instalación que no debe ser grande y que debe cumplir con un estricto criterio de producción para una baja demanda. Por lo tanto, su capacidad no es tan exigente como pudiera ser la de un sistema crítico para hospitales o investigación física. Se ha prescindido de la robustez necesaria en aceleradores de partículas. No habrá redundancia de sistemas, ni costosos sistemas de

seguridad. Tan solo lo estricto y necesario para el funcionamiento correcto y adecuado de la instalación.

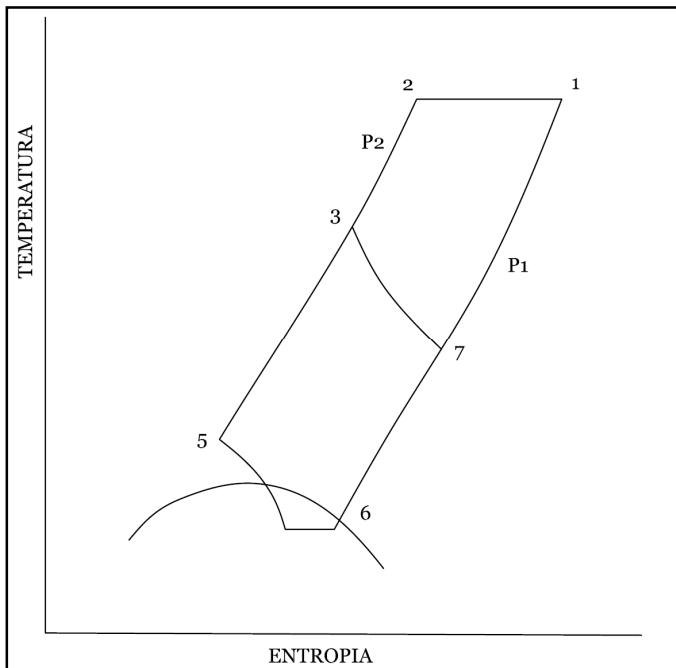


Ilustración 3. Diagrama T-s de un ciclo criogénico con regeneración

En cuanto a los componentes que constituyen esta instalación, dependen estrechamente del método de producción elegido. Y a su vez, el método es dependiente del tipo de ciclo. Si el ciclo es abierto, la tipología de ciclos es limitada y además, se añade la problemática del almacenamiento. Si el ciclo es cerrado, el abanico de posibilidades es muy amplio. En la ilustración numero 6 se muestra un mapa de métodos según sean de ciclo abierto o cerrado.

Como se ha dicho en la exposición de objetivos, la finalidad de esta instalación es producir nitrógeno líquido, que pueda ser utilizado en investigación. Este es un punto de partida, un mínimo.

A continuación, se ha realizado un diagrama de flujo, para enmarcar las posibilidades del propio proyecto.

Téngase presente que se está limitado por la técnica, en cuanto que el proyecto debe ser una instalación ejecutable en la medida de lo posible o de lo contrario se trataría de una instalación experimental. Estamos limitados por los conocimientos ingenieriles que de esta materia se dispone. Al no disponer de una literatura de técnica aplicada excesivamente extensa ni actualizada, hemos de recurrir a literatura reciente y con poca experiencia, en comparación con el frío industrial.

Estamos limitados también por la eficiencia energética. Cuando se realiza una primera aproximación a la materia, se puede observar que un criorefrigerador de baja capacidad, rara vez pasa de los 10 W de potencia frigorífica. A presiones y temperaturas tan bajas, los flujos másicos que trasiega el compresor son muy pequeños. Por lo tanto, el COP se desmorona hasta cifras que rondan el 4% de la eficiencia de un ciclo de Carnot.

Se debe adaptar la costumbre con las nuevas magnitudes. A continuación podemos ver una representación de la potencia en vatios (préstese especial atención a las unidades, hablamos de vatios, NO de kilowatios) en contraposición a la relación entre la eficiencia de un ciclo de Carnot y el método elegido:

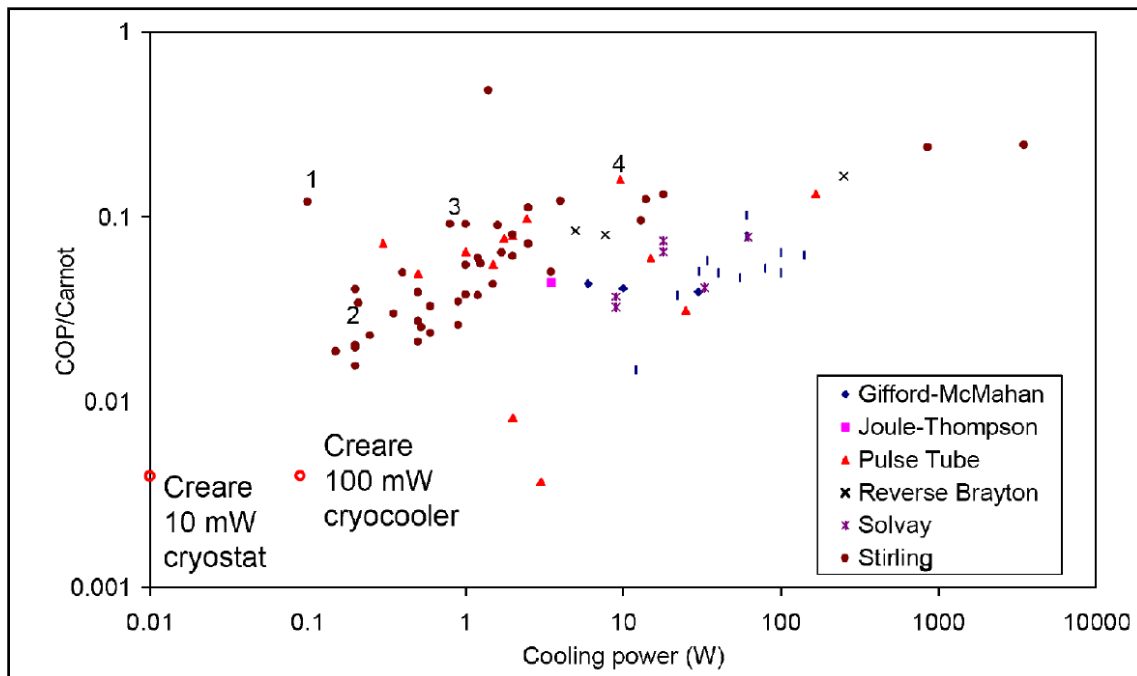


Ilustración 4. Grafico potencia - relación de eficiencias

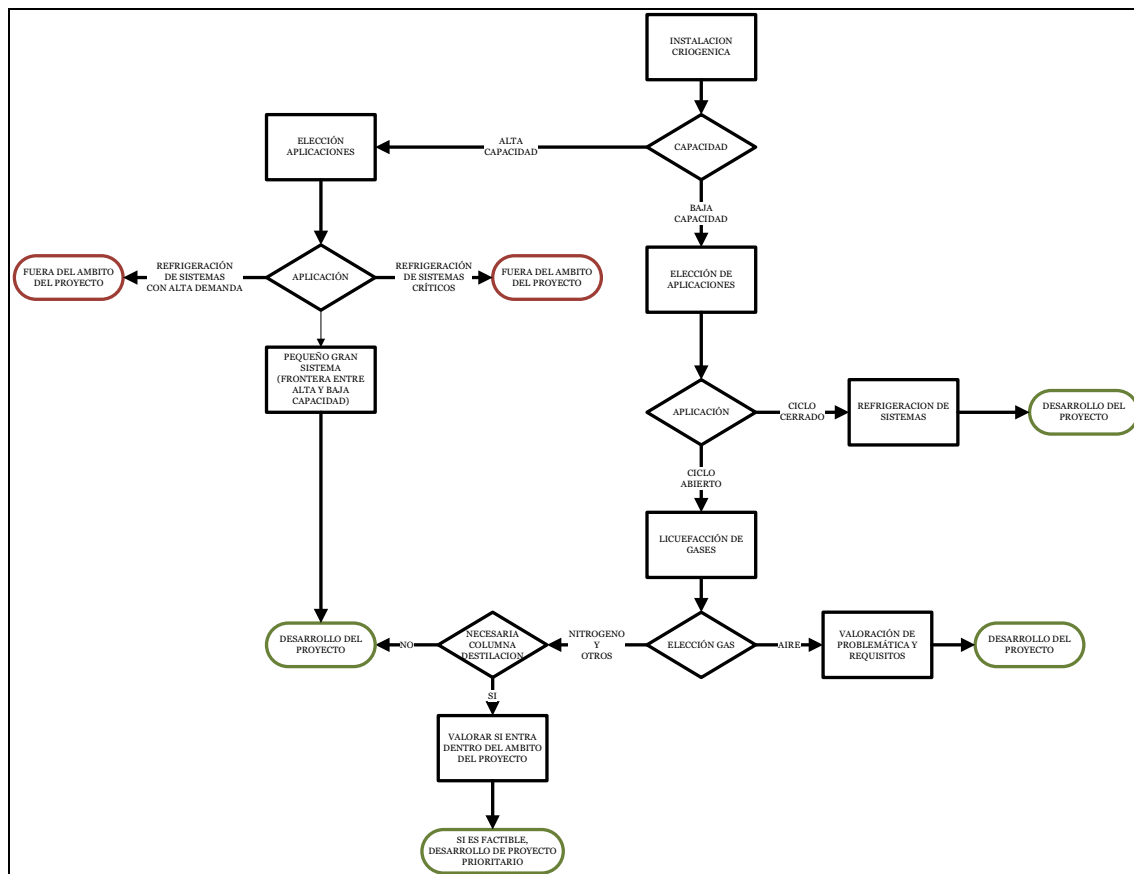


Ilustración 5. Diagrama de flujo sobre la elección del contenido del proyecto

A la vista del anterior diagrama de flujo, vemos que se ofrece cinco posibilidades que contemplan las limitaciones establecidas:

Si se elige *producir nitrógeno u otro gas permanente*, la fuente más barata es el aire atmosférico. Una vez limpio, el aire se enfría hasta licuar. Según el método, el aire precisa de una columna de destilación fraccionada para separar el nitrógeno del resto de componentes del aire. Por un lado es una desventaja, porque requiere de una *columna de destilación* con las complicaciones que conlleva y están fuera del ámbito de este proyecto. Como ventaja se debe observar, que el nitrógeno junto al argón es el componente del aire con más bajo punto de fusión. La energía empleada se invierte en obtener nitrógeno líquido (finalidad de la aplicación), oxígeno líquido (fácilmente utilizable en aplicaciones de laboratorio y soldadura), Argón (creación de atmosferas inertes en soldadura). El resto se devuelve a la atmosfera, sin ser considerado contaminante porque el balance de estos elementos se mantiene nulo.

En caso de no ser necesaria una columna de destilación, el proyecto es factible y se desarrolla.

En caso de elegir como sujeto de la *licuefacción al aire*, se debe valorar la dificultad de mantener la composición del aire durante y después del cambio de estado. Es frecuente que se produzca separación de componentes por los distintos puntos de fusión.

Si la aplicación elegida es factible, pero está en el límite *entre la alta y baja capacidad*, por ejemplo, la refrigeración de un imán para investigación o una aplicación laser para formación académica. No es una instalación descartable, pues la capacidad es más alta de lo pretendido, pero es ejecutable sin excesiva dificultad añadida.

Una ultima vía, es la posibilidad de utilizar un ciclo cerrado, para refrigerar un sistema sea del tipo que sea. En este caso, no se tiene porque elegir nitrógeno como refrigerante. Según la aplicación se puede llegar a emplear incluso metano o helio. El abanico de criogenos es amplio. No hay problema de almacenamiento y trasvase.

Haciendo una valoración preliminar, según la cantidad de bibliografía y conocimiento de la técnica, y sin perder de vista que se trata de un proyecto técnico, se puede decir que se abren dos vías: Un sistema de baja capacidad de ciclo cerrado utilizando un criogeno como el argón o helio, o un sistema de baja capacidad de ciclo abierto para producción de nitrógeno liquido pasando por alto gran parte del cálculo y desarrollo del método de separación.

A continuación se puede ver el conjunto de métodos disponibles:

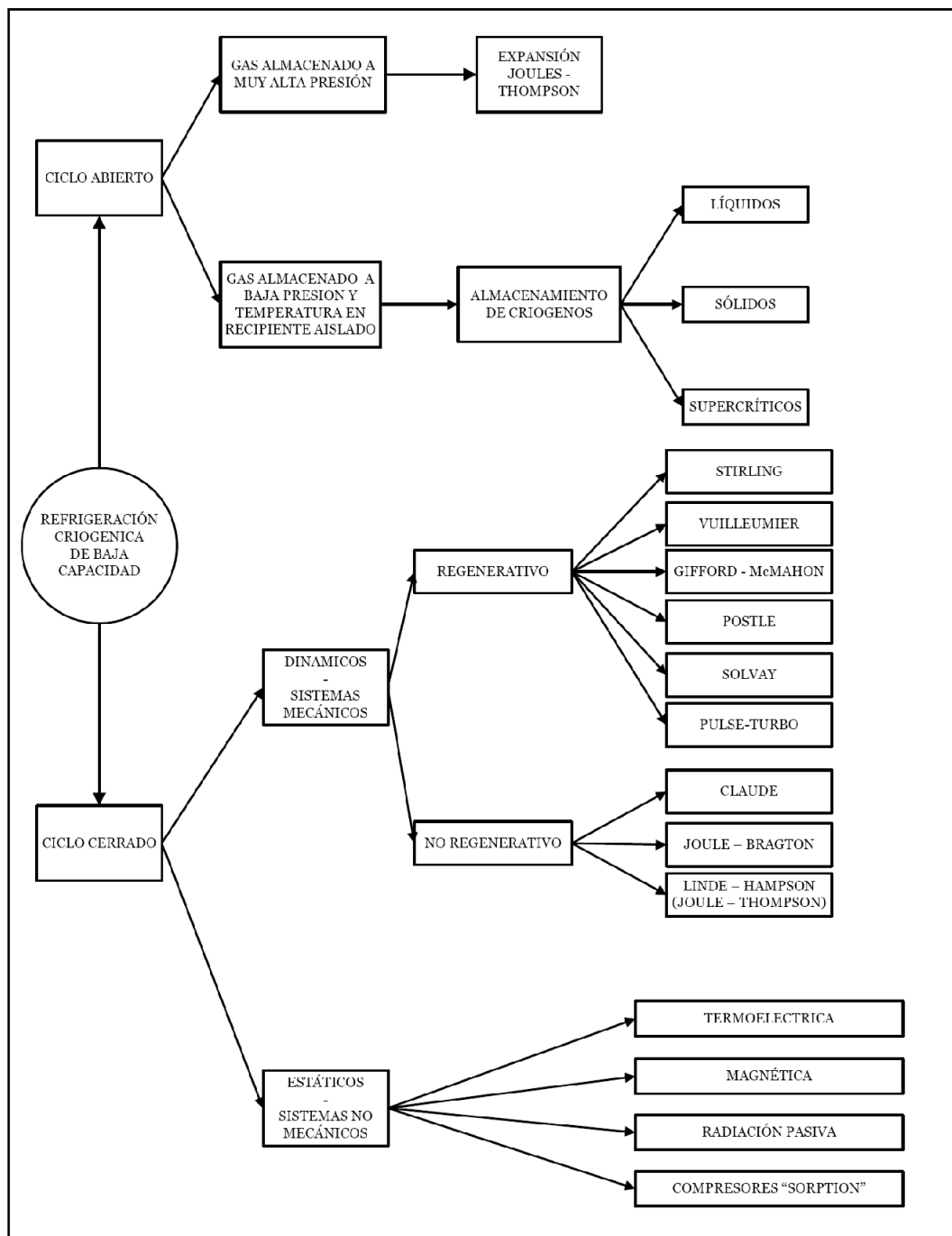


Ilustración 6. Clasificación de los sistemas criogenicos de baja capacidad

6. PLANIFICACIÓN

6.1 PLANIFICACIÓN CUATRIMESTRE DE OTOÑO

TAREA	Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04	Semana 05	Semana 06	Semana 07	Semana 08	Semana 09	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13	Semana 14	Semana 15	Semana 16	Semana 17	Semana 18	Semana 19	Semana 20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	11/09/2009	18/09/2009	25/09/2009	02/10/2009	09/10/2009	16/10/2009	23/10/2009	30/10/2009	06/11/2009	13/11/2009	20/11/2009	27/11/2009	04/12/2009	11/12/2009	18/12/2009	25/12/2009	08/01/2010	15/01/2010	22/01/2010	29/01/2010	05/02/2010	12/02/2010	19/02/2010	26/02/2010	05/03/2010	12/03/2010	19/03/2010	26/03/2010	02/04/2010	10/04/2010	17/04/2010	24/04/2010	01/05/2010	08/05/2010	15/05/2010	22/05/2010	29/05/2010	05/06/2010	12/06/2010	19/06/2010	26/06/2010	03/07/2010	10/07/2010	17/07/2010	24/07/2010	31/07/2010	07/08/2010	14/08/2010	21/08/2010	28/08/2010	04/09/2010	11/09/2010	18/09/2010	25/09/2010	02/10/2010	09/10/2010	16/10/2010	23/10/2010	30/10/2010	06/11/2010	13/11/2010	20/11/2010	27/11/2010	04/12/2010	11/12/2010	18/12/2010	25/12/2010	01/01/2011	08/01/2011	15/01/2011	22/01/2011	29/01/2011	05/02/2011	12/02/2011	19/02/2011	26/02/2011	05/03/2011	12/03/2011	19/03/2011	26/03/2011	02/04/2011	10/04/2011	17/04/2011	24/04/2011	01/05/2011	08/05/2011	15/05/2011	22/05/2011	29/05/2011	05/06/2011	12/06/2011	19/06/2011	26/06/2011	03/07/2011	10/07/2011	17/07/2011	24/07/2011	31/07/2011	07/08/2011	14/08/2011	21/08/2011	28/08/2011	04/09/2011	11/09/2011	18/09/2011	25/09/2011	02/10/2011	09/10/2011	16/10/2011	23/10/2011	30/10/2011	06/11/2011	13/11/2011	20/11/2011	27/11/2011	04/12/2011	11/12/2011	18/12/2011	25/12/2011	01/01/2012	08/01/2012	15/01/2012	22/01/2012	29/01/2012	05/02/2012	12/02/2012	19/02/2012	26/02/2012	05/03/2012	12/03/2012	19/03/2012	26/03/2012	02/04/2012	10/04/2012	17/04/2012	24/04/2012	01/05/2012	08/05/2012	15/05/2012	22/05/2012	29/05/2012	05/06/2012	12/06/2012	19/06/2012	26/06/2012	03/07/2012	10/07/2012	17/07/2012	24/07/2012	31/07/2012	07/08/2012	14/08/2012	21/08/2012	28/08/2012	04/09/2012	11/09/2012	18/09/2012	25/09/2012	02/10/2012	09/10/2012	16/10/2012	23/10/2012	30/10/2012	06/11/2012	13/11/2012	20/11/2012	27/11/2012	04/12/2012	11/12/2012	18/12/2012	25/12/2012	01/01/2013	08/01/2013	15/01/2013	22/01/2013	29/01/2013	05/02/2013	12/02/2013	19/02/2013	26/02/2013	05/03/2013	12/03/2013	19/03/2013	26/03/2013	02/04/2013	10/04/2013	17/04/2013	24/04/2013	01/05/2013	08/05/2013	15/05/2013	22/05/2013	29/05/2013	05/06/2013	12/06/2013	19/06/2013	26/06/2013	03/07/2013	10/07/2013	17/07/2013	24/07/2013	31/07/2013	07/08/2013	14/08/2013	21/08/2013	28/08/2013	04/09/2013	11/09/2013	18/09/2013	25/09/2013	02/10/2013	09/10/2013	16/10/2013	23/10/2013	30/10/2013	06/11/2013	13/11/2013	20/11/2013	27/11/2013	04/12/2013	11/12/2013	18/12/2013	25/12/2013	01/01/2014	08/01/2014	15/01/2014	22/01/2014	29/01/2014	05/02/2014	12/02/2014	19/02/2014	26/02/2014	05/03/2014	12/03/2014	19/03/2014	26/03/2014	02/04/2014	10/04/2014	17/04/2014	24/04/2014	01/05/2014	08/05/2014	15/05/2014	22/05/2014	29/05/2014	05/06/2014	12/06/2014	19/06/2014	26/06/2014	03/07/2014	10/07/2014	17/07/2014	24/07/2014	31/07/2014	07/08/2014	14/08/2014	21/08/2014	28/08/2014	04/09/2014	11/09/2014	18/09/2014	25/09/2014	02/10/2014	09/10/2014	16/10/2014	23/10/2014	30/10/2014	06/11/2014	13/11/2014	20/11/2014	27/11/2014	04/12/2014	11/12/2014	18/12/2014	25/12/2014	01/01/2015	08/01/2015	15/01/2015	22/01/2015	29/01/2015	05/02/2015	12/02/2015	19/02/2015	26/02/2015	05/03/2015	12/03/2015	19/03/2015	26/03/2015	02/04/2015	10/04/2015	17/04/2015	24/04/2015	01/05/2015	08/05/2015	15/05/2015	22/05/2015	29/05/2015	05/06/2015	12/06/2015	19/06/2015	26/06/2015	03/07/2015	10/07/2015	17/07/2015	24/07/2015	31/07/2015	07/08/2015	14/08/2015	21/08/2015	28/08/2015	04/09/2015	11/09/2015	18/09/2015	25/09/2015	02/10/2015	09/10/2015	16/10/2015	23/10/2015	30/10/2015	06/11/2015	13/11/2015	20/11/2015	27/11/2015	04/12/2015	11/12/2015	18/12/2015	25/12/2015	01/01/2016	08/01/2016	15/01/2016	22/01/2016	29/01/2016	05/02/2016	12/02/2016	19/02/2016	26/02/2016	05/03/2016	12/03/2016	19/03/2016	26/03/2016	02/04/2016	10/04/2016	17/04/2016	24/04/2016	01/05/2016	08/05/2016	15/05/2016	22/05/2016	29/05/2016	05/06/2016	12/06/2016	19/06/2016	26/06/2016	03/07/2016	10/07/2016	17/07/2016	24/07/2016	31/07/2016	07/08/2016	14/08/2016	21/08/2016	28/08/2016	04/09/2016	11/09/2016	18/09/2016	25/09/2016	02/10/2016	09/10/2016	16/10/2016	23/10/2016	30/10/2016	06/11/2016	13/11/2016	20/11/2016	27/11/2016	04/12/2016	11/12/2016	18/12/2016	25/12/2016	01/01/2017	08/01/2017	15/01/2017	22/01/2017	29/01/2017	05/02/2017	12/02/2017	19/02/2017	26/02/2017	05/03/2017	12/03/2017	19/03/2017	26/03/2017	02/04/2017	10/04/2017	17/04/2017	24/04/2017	01/05/2017	08/05/2017	15/05/2017	22/05/2017	29/05/2017	05/06/2017	12/06/2017	19/06/2017	26/06/2017	03/07/2017	10/07/2017	17/07/2017	24/07/2017	31/07/2017	07/08/2017	14/08/2017	21/08/2017	28/08/2017	04/09/2017	11/09/2017	18/09/2017	25/09/2017	02/10/2017	09/10/2017	16/10/2017	23/10/2017	30/10/2017	06/11/2017	13/11/2017	20/11/2017	27/11/2017	04/12/2017	11/12/2017	18/12/2017	25/12/2017	01/01/2018	08/01/2018	15/01/2018	22/01/2018	29/01/2018	05/02/2018	12/02/2018	19/02/2018	26/02/2018	05/03/2018	12/03/2018	19/03/2018	26/03/2018	02/04/2018	10/04/2018	17/04/2018	24/04/2018	01/05/2018	08/05/2018	15/05/2018	22/05/2018	29/05/2018	05/06/2018	12/06/2018	19/06/2018	26/06/2018	03/07/2018	10/07/2018	17/07/2018	24/07/2018	31/07/2018	07/08/2018	14/08/2018	21/08/2018	28/08/2018	04/09/2018	11/09/2018	18/09/2018	25/09/2018	02/10/2018	09/10/2018	16/10/2018	23/10/2018	30/10/2018	06/11/2018	13/11/2018	20/11/2018	27/11/2018	04/12/2018	11/12/2018	18/12/2018	25/12/2018	01/01/2019	08/01/2019	15/01/2019	22/01/2019	29/01/2019	05/02/2019	12/02/2019	19/02/2019	26/02/2019	05/03/2019	12/03/2019	19/03/2019	26/03/2019	02/04/2019	10/04/2019	17/04/2019	24/04/2019	01/05/2019	08/05/2019	15/05/2019	22/05/2019	29/05/2019	05/06/2019	12/06/2019	19/06/2019	26/06/2019	03/07/2019	10/07/2019	17/07/2019	24/07/2019	31/07/2019	07/08/2019	14/08/2019	21/08/2019	28/08/2019	04/09/2019	11/09/2019	18/09/2019	25/09/2019	02/10/2019	09/10/2019	16/10/2019	23/10/2019	30/10/2019	06/11/2019	13/11/2019	20/11/2019	27/11/2019	04/12/2019	11/12/2019	18/12/2019	25/12/2019	01/01/2020	08/01/2020	15/01/2020	22/01/2020	29/01/2020	05/02/2020	12/02/2020	19/02/2020	26/02/2020	05/03/2020	12/03/2020	19/03/2020	26/03/2020	02/04/2020	10/04/2020	17/04/2020	24/04/2020	01/05/2020	08/05/2020	15/05/2020	22/05/2020	29/05/2020	05/06/2020	12/06/2020	19/06/2020	26/06/2020	03/07/2020	10/07/2020	17/07/2020	24/07/2020	31/07/2020	07/08/2020	14/08/2020	21/08/2020	28/08/2020	04/09/2020	11/09/2020	18/09/2020	25/09/2020	02/10/2020	09/10/2020	16/10/2020	23/10/2020	30/10/2020	06/11/2020	13/11/2020	20/11/2020	27/11/2020	04/12/2020	11/12/2020	18/12/2020	25/12/2020	01/01/2021	08/01/2021	15/01/2021	22/01/2021	29/01/2021	05/02/2021	12/02/2021	19/02/2021	26/02/2021	05/03/2021	12/03/2021	19/03/2021	26/03/2021	02/04/2021	10/04/2021	17/04/2021	24/04/2021	01/05/2021	08/05/2021	15/05/2021	22/05/2021	29/05/2021	05/06/2021	12/06/2021	19/06/2021	26/06/2021	03/07/2021	10/07/2021	17/07/2021	24/07/2021	31/07/2021	07/08/2021	14/08/2021	21/08/2021	28/08/2021	04/09/2021	11/09/2021	18/09/2021	25/09/2021	02/10/2021	09/10/2021	16/10/2021	23/10/2021	30/10/2021	06/11/2021	13/11/2021	20/11/2021	27/11/2021	04/12/2021	11/12/2021	18/12/2021	25/12/2021	01/01/2022	08/01/2022	15/01/2022	22/01/2022	29/01/2022	05/02/2022	12/02/2022	19/02/2022	26/02/2022	05/03/2022	12/03/2022	19/03/2022	26/03/2022	02/04/2022	10/04/2022	17/04/2022	24/04/2022	01/05/2022	08/05/2022	15/05/2022	22/05/2022	29/05/2022	05/06/2022	12/06/2022	19/06/2022	26/06/2022	03/07/2022	10/07/2022	17/07/2022	24/07/2022	31/07/2022	07/08/2022	14/08/2022	21/08/2022	28/08/2022	04/09/2022	11/09/2022	18/09/2022	25/09/2022	02/10/2022	09/10/2022	16/10/2022	23/10/2022	30/10/2022	06/11/2022	13/11/2022	20/11/2022	27/11/2022	04/12/2022	11/12/2022	18/12/2022	25/12/2022	01/01/2023	08/01/2023	15/01/2023	22/01/2023	29/01/2023	05/02/2023	12/02/2023	19/02/2023	26/02/2023	05/03/2023	12/03/2023	19/03/2023	26/03/2023	02/04/2023	10/04/2023	17/04/2023	24/04/2023	01/05/2023	08/05/2023	15/05/2023	22/05/2023	29/05/2023	05/06/2023	12/06/2023	19/06/2023	26/06/2023	03/07/2023	10/07/2023	17/07/2023	24/07/2023	31/07/2023	07/08/2023	14/08/2023	21/08/2023	28/08/2023	04/09/2023	11/09/2023	18/09/2023	25/09/2023	02/10/2023	09/10/2023	16/10/2023	23/10/2023	30/10/2023	06/11/2023	13/11/2023	20/11/2023	27/11/2023	04/12/2023	11/12/2023	18/12/2023	25/12/2023	01/01/2024	08/01/2024	15/01/2024	22/01/2024	29/01/2024	05/02/2024	12/02/2024	19/02/2024	26/02/2024	05/03/2024	12/03/2024	19/03/2024	26/03/2024	02/04/2024	10/04/2024	17/04/2024	24/04/2024	01/05/2024	08/05/2024	15/05/2024	22/05/2024	29/05/2024	05/06/2024	12/06/2024	19/06/2024	26/06/2024	03/07/2024	10/07/2024	17/07/2024	24/07/2024	31/07/2024	07/08/2024	14/08/2024	21/08/2024	28/08/2024	04/09/2024	11/09/2024	18/09/2024	25/09/2024	02/10/2024	09/10/2024	16/10/2024	23/10/2024	30/10/2024	06/11/2024	13/11/2024	20/11/2024	27/11/2024	04/12/2024	11/12/2024	18/12/2024	25/12/2024	01/01/2025	08/01/2025	15/01/2025	22/01/2025	29/01/2025	05/02/2025	12/02/2025	19/02/2025	26/02/2025	05/03/2025	12/03/2025	19/03/2025	26/03/2025	02/04/2025	10/04/2025	17/04/2025

6.2 PLANIFICACIÓN DEL CUATRIMESTRE DE PRIMAVERA

[illegible]