

# "FABRICAÇÃO E TESTES DE ANÉIS DE RULON PARA LIQUEFADORES OU REFRIGERADORES DE CICLO STIRLING"

JONHSON FRANCISCO ORDOÑEZ  
TADASHI SHIOSAWA

## RESUMO

Neste trabalho destacamos um dos componentes essenciais para o funcionamento dos liquefadores de nitrogênio de ciclo stirling, o anel de selo dinâmico, originalmente feito de rulon. Este anel deve ser substituído a cada 1000 horas de funcionamento da máquina (o equivalente a 4 meses para os liquefadores do IFGW). O laboratório de criogenia em conjunto com uma indústria nacional, desenvolveu o anel de rulon para os liquefadores de nitrogênio de ciclo Stirling.

## I - INTRODUÇÃO

O refrigerador de Stirling é o sistema cujo co eficiente de performance mais se aproxima do ciclo de Carnot.

Essa tecnologia tem inúmeras aplicações podendo liquefazer gases e utilizar a baixa temperatura do líquido em pesquisas ou processos industriais, com as vantagens de ser mais econômico pelo alto co eficiente de performance e ocupar menor espaço por ser compacto.

## II - O CICLO DE STIRLING

Primeira Etapa - ( $P_1 - P_{max}$ ) o gás é comprimido isotermicamente refeitando calor para a água.

Segunda Etapa - ( $P_{max} - P_2$ ) o gás é forçado através do regenerador pelo movimento do deslocador. O gás é esfriado a volume constante pelo regenerador. A energia retirada do gás não é transferida para o ambiente mas estocada no regenerador.

Terceira Etapa - ( $P_2 - P_{min}$ ) o gás é expandido isotermicamente absorvendo calor da

fonte fria.

Quarta Etapa - O gás é forçado através do regenerador pelo movimento do deslocador. O gás é aquecido no regenerador pelo calor estocado no processo ( $P_{max} - P_2$ )

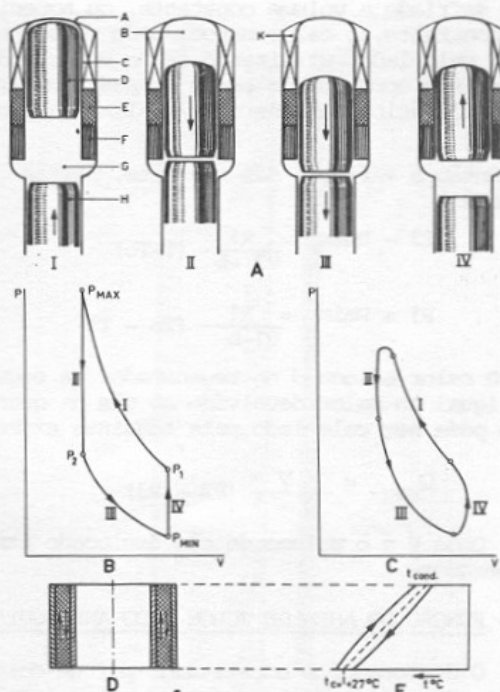


Fig. 1 - Representação esquemática das partes internas de um refrigerador de ciclo Stirling com arranjo coaxial de trocador de calor e regenerador.

O calor rejeitado para a água na primeira etapa pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$Q_{H2O} = m T_o (S_2 - S_1)$$

E o calor absorvido na terceira etapa

$$Q = m T (S_4 - S_3)$$

onde : m - massa de gás refrigerante

$T_o$  - temperatura da fonte quente

T - temperatura da fonte fria

$S_i$  - entropia em cada ponto de ciclo

O coeficiente de performance do liquefator será dado por:

$$FOM = \frac{T}{T_o \frac{(S2 - S1)}{S4 - S3} - T}$$

Se o gás refrigerante for considerado um gás ideal:  $S2 - S1 = S4 - S3$ , então o refrigerador de ciclo Stirling será igual ao coeficiente de performance de um refrigerador de ciclo Stirling.

$$FOM = \frac{T}{T_o - T}$$

Na prática o liquefator não atinge essa performance principalmente devido a ineficiência do regenerador e a utilização de um gás não ideal.

Nas etapas ( $P_{max} - P2$ ) e ( $P_{min} - P1$ ), onde o gás é esfriado a volume constante, ou aquecido a volume constante, o calor estocado no regenerador pode ser calculado, utilizando-se da equação de Vander Walls e aproximando essas etapas a uma transformação adiabática considerando a alta frequência do ciclo.

Então a variação das pressões, nestas duas etapas será:

$$P2 - P_{max} = \frac{R1}{V2 - b} (T - T_o)$$

$$P1 - P_{min} = \frac{R1}{V1 - b} (T_o - T)$$

O calor estocado no regenerador na segunda etapa é igual ao calor devolvido ao gás na quarta etapa, e pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$Q_{reg} = \frac{V}{\gamma - 1} (P2 - P3)$$

Onde  $V$  é o volume do gás deslocado através do regenerador.

### III - FUNÇÃO DO ANEL DE RULON E DO ANEL GUIA

O deslocador é constituído por um corpo e um suporte de anéis. Neste suporte, estão localizados o anel guia e o anel de rulon que se movimentam ao longo da bucha do trocador de calor. Duas molas em forma de anel de aço mantêm o anel de rulon pressionado contra a parte interna da bucha do trocador de calor.

O anel guia mantém o deslocador alinhado com o trocador de calor, enquanto o anel de selo impede a passagem indevida do gás refrigerante, da zona de compressão para a zona de expansão. Como não pode haver óleo no gerador, a bucha do trocador de calor não pode ser lubrificada, por isso estes anéis devem ser constituídos de materiais que não necessitam de lubrificação e que deslize livremente vedando o gás sem provocar desgastes na bucha.

Um anel de selo deficiente permite a passagem do gás da zona de compressão para a zona de expansão, ou vice versa, através da bucha do trocador de calor. Dessa forma haverá duas correntes de gás, uma parte do volume  $V$  do gás atravessa o regenerador,

outra passa diretamente através da bucha. Como consequência disto a queda de temperatura do gás prevista na segunda etapa, bem como a elevação da temperatura na quarta etapa fica comprometida, ou seja, o processo isocórico não ocorre, e o refrigerador perde de sua capacidade de refrigeração.

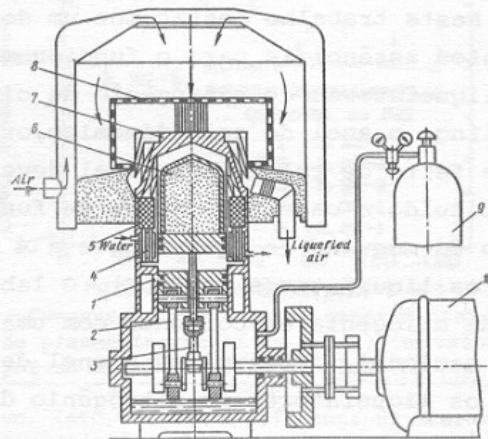


Fig. 2 - Liquefator de ar de ciclo Stirling  
4- trocador de calor / 5- regenerador /  
6- deslocador

### IV - FABRICAÇÃO E TESTES

Estes anéis são fabricados com teflow associados a um determinado material. A incorporação desses materiais ao teflow altera sua característica. As principais incorporações são feitas com fibra de vidro, carbono, grafite, bronze, MOS2. Para a fabricação do anel foi escolhida a composição teflow e fibra de vidro, porque esse composto possui alta resistência à compressão e resistência ao desgaste:

PROPRIEDADES DO PTFE (I)  
Tabela FT- 02-2

| PROPRIEDADE          | UNIDADE | TESTE     | PTFE PURO  | c/ 15% FIBRA VIDRO |
|----------------------|---------|-----------|------------|--------------------|
| Densidade            | g/cm³   | DIN 53479 | 2,17 a 2,2 | 2,21               |
| Elogação/Ruptura     | %       |           | 250a 400   | 300a 350           |
| Resistência a tração | Kg/cm²  |           | 200a 300   | 175 a 245          |
| Dureza               | Shore D |           | 50a57      | 52 a 57            |
| Deformação           |         |           |            |                    |
| Debaixo de carga     |         | ASTM      |            |                    |
| 100hrs. 23°C-140     |         |           |            |                    |
| Kg/cm²               | %       | 0621      | 15         | 11                 |

| PROPRIEDADE                      | UNIDADE                                                                                 | TESTE | PTFE PURO | C/15% FIBRA VIDRO |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|-------------------|
| Condutibilidade térmica          | 10 <sup>-4</sup> cal/cm *C                                                              |       | 6         | 8                 |
| Coefficiente de fricção Dinâmica |                                                                                         |       | 0,06      | 0,13              |
| Resistência à intempéria         |                                                                                         |       | excel.    | excelente         |
| Absorção de água                 | %                                                                                       | D570  | <0,01     | 0,015             |
| Resistência química              |                                                                                         |       | 2 excel.  | 2                 |
| Porosidade/Permeabilidade        | Todos os materiais podem ser não porosos, dependendo da técnica de fabricação utilizada |       |           |                   |

PROPRIEDADE DO PTFE (I)  
Tabela FT - 02-2

| PROPRIEDADE                                                    | .C/25% F.Vidro                                                                          | C/25% Carbono | C/15% Grafite | C/60% Bronze |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| Densidade                                                      | 2,24                                                                                    | 2,09          | 2,18          | 3,9          |
| Elongação/Ruptura                                              | 200 a 300                                                                               | 150 a 180     | 150 a 200     | 80 a 120     |
| Resistência à tração                                           | 125 a 200                                                                               | 120 a 155     | 140 a 210     | 105 a 140    |
| Dureza                                                         | 55a70                                                                                   | 60a65         | 55a65         | 55a65        |
| Deformação Debaixo de carga 100hrs-23°C-140 Kg/cm <sup>2</sup> | 8,5                                                                                     | 6             | 7,5           | 5,1          |
| Condutibilidade térmica                                        | 9                                                                                       | 13            | 11            | 19           |
| Coefficiente de fricção Dinâm.                                 | 0,12                                                                                    | 0,13          | 0,07          | 0,13         |
| Resistência à intempérie                                       | excel.                                                                                  | excel.        | excel.        | excel.       |
| Absorção de água                                               |                                                                                         |               |               | 0,019        |
| Resistência química                                            | 2                                                                                       | 2             | 2             | 2            |
| Porosidade/Permeabilidade                                      | Todos os materiais podem ser não porosos, dependendo da técnica de fabricação utilizada |               |               |              |

NOTAS : 1)Valores médios de tabela, não devem ser usado p/ especificação.  
2)Solicite tabela resistência química, para informações mais detalhadas.  
3)Variando-se as condições de processo, pode-se alterar consideravelmente as propriedades das peças da PTFE-Teflon.  
4)Solicite maiores informações, caso necessite dados mais detalhados.

A vida útil deste anel é de aproximadamente 1000 horas.Como a rotação do motor do liquefator de 1750 rpm e o curso do deslocador 30mm, o anel desloca-se com uma velocidade média de 6,3Km/h.

Portanto ao longo de sua vida útil, o anel percorre uma distância média de 6.300Km(Para efeito de comparação aproximadamente o comprimento linear do litoral brasileiro.

Os testes foram feitos com o anel de teflon com grafite e teflon com fibra de vidro (Rulon). O primeiro apesar de possuir boas propriedades de deslizamento, desgastou-se rápido e sua utilização é desaconselhável porque a cada troca é necessário a desmontagem da máquina. O segundo durou mais de 1000 horas sem que o refrigerador perdesse sua eficiência. O desgaste médio nesse período foi de 7,5% da espessura inicial (1,05m).Testamos vários anéis e em diversas condições e constatamos que todas tiveram desempenho satisfatório.

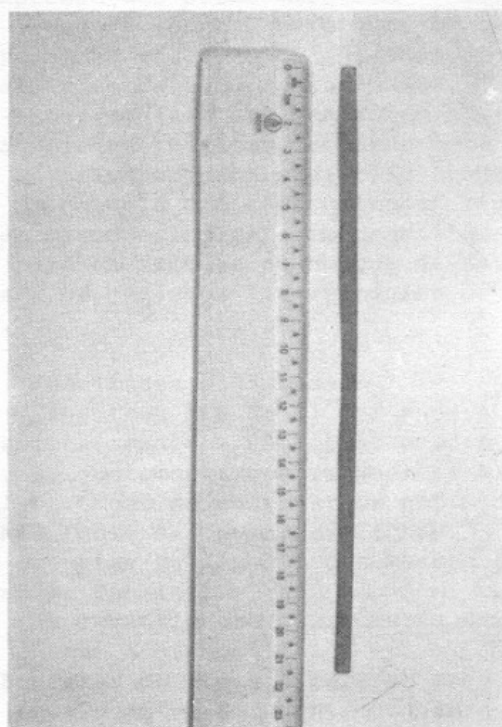


Fig. 3 - Fotografia do Anel de Rulon  
Quadro Comparativo

| anel de Rulon | Vida útil | Material | Custo     | Prazo de entrega    |
|---------------|-----------|----------|-----------|---------------------|
| Importado     | +1000hs   | Rulon    | US\$21,00 | Em geral + 180 dias |
| Nacional      | +1000hs   | Rulon    | US\$10,00 | 60 dias             |

## 5. CONCLUSÃO

O anel de rulon é adequado para vedação de gás He ou H<sub>2</sub>, nos deslocadores dos liquefadores de ciclo Stirling.Essa mesma composição pode ser utilizada na fabricação do anel guia e do acento da válvula.

vula de partida.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- 1) Apostila do Curso Criogenia (Prof. Jonhson Francisco Ordoñez).
- 2) Arkharov A., Theory and Design of Crygenic Systems.
- 3) Proton Plástico de Precisão Ltda. - Tabela de Dados.