

Índice

1. OBJECTIVO	4
2. RESUMO	4
3. INTRODUÇÃO	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4.1. MOTORES STIRLING	6
4.1.1. <i>Enquadramento histórico</i>	8
4.1.2. <i>Classificação dos motores Stirling</i>	9
4.1.2.1. <i>Motor tipo alfa (α)</i>	9
4.1.2.2. <i>Motor tipo beta (β)</i>	9
4.1.2.3. <i>Motor tipo gama (γ)</i>	9
4.1.3. <i>Os componentes do motor Stirling</i>	11
4.1.4. <i>O ciclo Stirling ideal</i>	11
4.1.5. <i>Princípio de funcionamento e ciclo termodinâmico</i>	12
4.1.6. <i>Esquema de funcionamento</i>	15
5. REGENERADORES	17
5.1. <i>INTRODUÇÃO</i>	17
5.2. <i>TIPO DE REGENERADORES</i>	18
5.2.1. <i>Regeneradores de matriz fixa</i>	18
5.2.2. <i>Regeneradores rotativos</i>	19
5.3. <i>MATERIAIS USADOS EM PROJECTO DE REGENERADORES</i>	20
5.4. <i>REGENERADOR COWPER</i>	21
5.5. <i>TEMPERATURA MÉDIA EFECTIVA DO REGENERADOR</i>	21
6. MÉTODO EXPERIMENTAL	23
6.1. <i>METODOLOGIA</i>	23
6.2. <i>MATERIAL USADO</i>	23
6.3. <i>EQUIPAMENTO</i>	24
6.4. <i>LAY- OUT DA EXPERIÊNCIA</i>	25
6.5. <i>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</i>	26
7. RESULTADOS OBTIDOS/ DISCUSSÃO	26
8. CONCLUSÃO	38
9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	39
10. BIBLIOGRAFIA	40

Índice de Figuras

Fig.1. -----5
 Fig.2. -----6
 Fig.3. -----10
 Fig.4. -----10
 Fig.5. -----10
 Fig.6. -----13
 Fig.7. -----13
 Fig.8. -----14
 Fig.9. -----14
 Fig.10. -----15
 Fig.11. -----18
 Fig.12. -----20
 Fig.13. -----21
 Fig.14. -----22
 Fig.15. -----24
 Fig.16. -----25
 Fig.17. -----25
 Fig.18. -----25
 Fig.19. -----25
 Fig.20. -----25
 Fig.21. -----25
 Fig.22. -----26
 Fig.23. -----26
 Fig.24. -----26
 Fig.25. -----29
 Fig.26. -----30
 Fig.27. -----30
 Fig.28. -----33
 Fig.29. -----34
 Fig.30. -----34
 Fig.31. -----36
 Fig.32. -----37

Índice de tabelas

Tabela 1 -----27
 Tabela 2 -----28
 Tabela 3 -----28
 Tabela 4 -----31
 Tabela 5 -----32
 Tabela 6 -----32
 Tabela 7 -----35
 Tabela 8 -----35
 Tabela 9 -----36
 Tabela 10 -----36
 Tabela 11 -----36

Os agradecimentos

A toda minha família, a minha avó e aos meus pais em particular. A minha namorada Dulce e a todos os meus colegas de curso e também da associação.

Por último e relacionado directamente com este trabalho, quero agradecer ao meu orientador professor Brójo e também ao senhor João que me apoiou muito no fabrico das peças e não só.

1. OBJECTIVO

Este trabalho tem por objectivo aprofundar os conhecimentos acerca dos processos inerentes a manufactura de um motor de Stirling, nomeadamente no que diz respeito em particular aos regeneradores, mas também para dar uma visão sobre a forma como é feita a recuperação de energia térmica, sobre o ponto de vista de um processo de regeneração.

2. RESUMO

Este projecto tem como principais metas a manufactura de um regenerador e posteriormente, serão elaborados testes para um estudo paramétrico.

Palavra-chave: *regenerador*

3. INTRODUÇÃO

Motor Stirling é um motor de ar quente, que converte calor em trabalho- é o segundo motor a calor mais antigo. Tem muitas propriedades positivas, como a de precisar apenas de uma diferença de temperatura para funcionar independentemente se essa diferença é conseguida pelo aquecimento solar ou por combustível convencional. Esta característica torna-o bastante flexível e beneficia o ambiente. [4]

Apesar de as pesquisas de aplicações serem recentes, o ciclo Stirling como concepção em si, é bastante antigo. Em 1816, o engenheiro escocês Robert Stirling criou um modelo de um motor que utiliza um determinado volume de um gás qualquer, que é aquecido externamente, sendo forçado a entrar numa câmara de volume maior que o inicial, onde o gás pode expandir-se livremente. A energia desta expansão pode ser usada para mover motores, gerar energia, ou outra aplicação que se desejar. Ou, como foi usado em 1873, para refrigeração e/ou aquecimento, absorvendo calor no estágio de compressão e libertar trabalho ou mais calor na fase de expansão. Nesta época foram criados alguns protótipos com uso do ciclo Stirling.

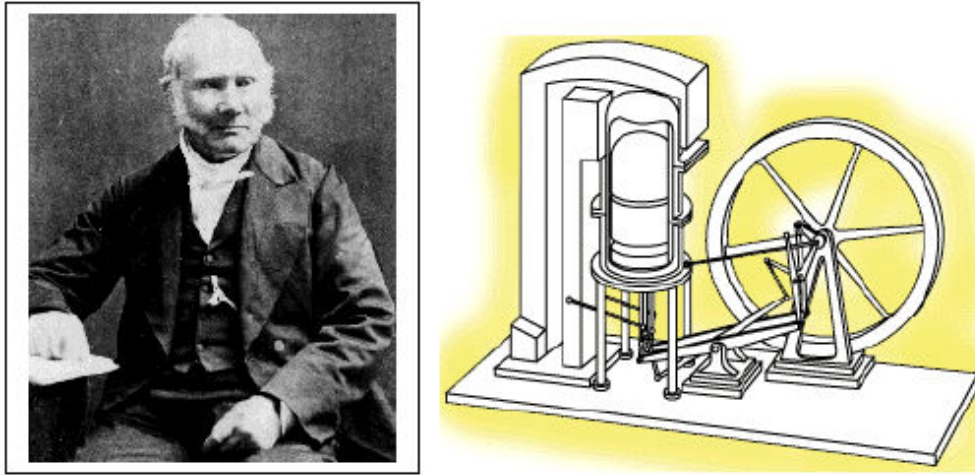


Fig.1. Robert Stirling

O motor de Stirling está entre os tipos de motores mais simples e tem uma longa história. É um motor que outrora foi denominado pré-aquecedor. Nessa altura, os motores a vapor apresentavam baixas eficiências e eram bastante inseguros. As caldeiras explodiam frequentemente, e o vapor de alta pressão que era libertado tinha efeitos devastadores. O motor de Stirling prometia superar ambos os problemas.

O ressurgimento no desenvolvimento do motor de Stirling foi iniciado outra vez em 1930, tendo o conceito despertado interesse a vários investigadores. O motor pode funcionar com uma gama variada de fontes de combustível e produz um trabalho cuja eficiência se aproxima bastante da eficiência ideal teórica, o que não sucede com a maioria dos motores.

As configurações mecânicas dos motores de Stirling são geralmente divididas em três grupos conhecidos como os arranjos α , β e γ . [3]

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. MOTORES STIRLING

Em 1990, a NASA desenvolveu um motor Stirling de 25kW para um programa espacial denominado SP-100. Este sistema consistia em dois motores de 12.5kW ligados nas suas zonas quentes e montados num arranjo linear de forma a ser minimizada a vibração. Potência térmica foi introduzida no centro através de um inovador cabeçote aquecedor. Após cerca de 1500 horas de funcionamento como um sistema duplo de motor, a unidade foi desmontada em dois motores geradores de potência para um estudo mais aprofundado.

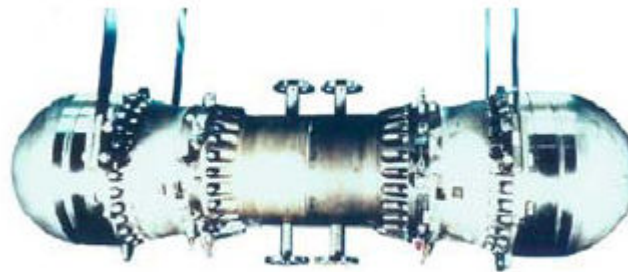


Fig.2 Motor Stirling espacial de 25kW [11]

O ciclo termodinâmico Stirling permite a construção de motores que podem funcionar a partir de uma fonte de calor qualquer. As pesquisas são recentes em todas as partes do mundo, actualmente há algumas empresas que se estão a especializar na fabricação dos motores Stirling; há até mesmo, pesquisas que desenvolvem motores que simplesmente operam a partir de uma fonte sonora. Os motores Stirling têm, nas suas várias configurações, basicamente dois lados ou partes. Uma é a parte quente e a outra é a parte fria. Esta divisão ocorre devido ao estado do gás ou fluido de trabalho durante o ciclo termodinâmico, na sua expansão e compressão, absorvendo e libertando calor. O ciclo Stirling, no seu lado quente, aproveita a energia térmica (calor) de outra fonte, que pode ser proveniente da queima de algum combustível ou de certas quantidades de calor rejeitadas em outros ciclos, como por exemplo, os condensadores das termoelétricas, ou do escape dos automóveis. A partir desse calor, o ciclo Stirling é capaz de produzir trabalho, que pode ser aproveitado para a geração de energia e também pode funcionar como um frigorífico, em substituição aos compressores selados actuais. A parte fria do motor Stirling é o arrefecedor (evaporador dos actuais - ciclo Rankine).

Algumas empresas estão a desenvolver refrigeradores e caixas térmicas que funcionam a partir da queima de gás e também a partir da energia solar. Em breve, espera-se que os motores de combustão interna, que trabalham com a queima de alguns derivados de petróleo na forma líquida, entrem em desuso, devido à viabilização do ciclo Stirling e outros ciclos. Outro contemporâneo do Stirling é William Rankine, que criou um ciclo que foi melhor aceite para o uso na refrigeração por causa do advento dos fluidos refrigerantes, como os CFC's ou freons e outros líquidos refrigerantes. Contudo, nos últimos anos do século passado, as inovações proporcionaram um aumento de eficiência na geração de médias potências com menores investimentos. O que possibilita essa redução nos custos é a significativa eficiência do ciclo Stirling, alcançada sem o uso de flúor carbonos como fluido de trabalho. Refrigeradores Stirling incorporam ao motor o uso de “pistão livre” (denominados internacionalmente de: *Stirling Free-Piston*) e o uso de hélio ou azoto, por exemplo, em vez de CFC's e HFC's, o que é muito bem visto, tanto que as grandes companhias estão cada vez mais a usar e desenvolver esta tecnologia. Os grandes fabricantes de veículos automóveis, como a *Daimler Chrysler Corp.*, são os principais responsáveis pelo desenvolvimento da tecnologia Stirling para uso na refrigeração.

Os motores Stirling têm vindo a ser estudados quanto a sua viabilidade para a geração de energia eléctrica, por causa de sua eficiência, que é considerada por muitos como a melhor em relação a outros métodos de geração e, principalmente, quando se deseja o uso alternativo aos combustíveis fósseis. Habitualmente, o ciclo mais utilizado (e por isso mais estudado) nos refrigeradores domésticos, por exemplo, é o ciclo Rankine. Para estes casos, o ciclo Stirling pode ser usado como alternativa, para assim actuar com mais eficiência e de maneira ecológica se comparado com os refrigeradores que ainda utilizam CFC's ou HFC's. O ciclo Stirling pode também ser usado em outras aplicações, como no caso da utilização de um motor para obtenção de trabalho mecânico, ou energia cinética, que pode ser convertida posteriormente em energia eléctrica. Este motor pode operar a partir de uma fonte térmica, que normalmente está a ser desperdiçada ou eliminada por outro processo qualquer. Portanto, o motor Stirling pode estar transformar algo, eventualmente “perdido”, em trabalho útil ou energia eléctrica. Actualmente estão a ser desenvolvidos diversos estudos que têm por finalidade projectar e fabricar motores a operar segundo o ciclo termodinâmico Stirling, como motores de “pistão-livre” e, até mesmo, motores que funcionam por meio de vibrações provocadas por ondas sonoras, os chamados motores acústicos. [2]

4.1.1. Enquadramento histórico

O motor Stirling foi inventado em 16 de Novembro de 1816 pelo reverendo de 26 anos de idade, Robert Stirling, na Escócia. Apresentou na época, a vantagem de ser um motor mais seguro, principalmente pelo menor nível de pressão utilizado comparado com os motores a vapor utilizados até então, que causavam a morte de vários trabalhadores devido a explosões na caldeira. Em 1827 construiu uma versão melhorada com seu irmão James que era engenheiro. No final do século XIX as versões pequenas já eram bastante comuns nas casas da classe alta. É notável que construíram o motor oito anos antes de Carnot publicar o seu trabalho sobre o processo de Carnot.

O motor Stirling teve um uso bastante comum até aos anos de 1920, quando os motores de combustão interna e os motores eléctricos o tornaram redundante. O motor Otto foi inventado em 1877 e o motor diesel em 1893, e estes apresentavam maior potência comparada aos motores Stirling da época. Além disso, os motores Stirling requeriam uma atenção especial em sua manufactura, que tinha uma tolerância mais estreita do que a requerida pelos motores de combustão interna. A combinação de um menor custo de fabricação e uma maior potência gerada pelos motores de combustão interna, levaram ao desaparecimento comercial do motor Stirling.

Após a segunda Guerra Mundial, com a invenção da classe dos aços inoxidáveis, e com o aumento do conhecimento matemático que explica a operação do ciclo do motor Stirling, acarretou no desenvolvimento de um motor mais barato e mais eficiente. Quando a tecnologia do motor aumentou, a sua capacidade de usar qualquer combustível disponível passou a gerar interesse em seu ciclo novamente.

Devido ao motor Stirling ser de combustão externa, e não requerer re-enchimento, ele é indicado para regiões isoladas, onde é necessária a geração de potência, ou seja, trabalhar como geração distribuída.

Durante os últimos anos o motor de Stirling tornou-se completamente popular outra vez. Em 1990 Dr. Senft estabeleceu um recorde mundial nos motores diferenciais de Stirling de baixa temperatura, funcionando com uma diferença de temperatura de apenas 0.5 Kelvin. [4]

4.1.2. Classificação dos motores Stirling

Os motores Stirling são divididos em geral em três grupos, Alfa, Beta e Gama, de acordo com a configuração dos cilindros e pistões.

Os motores Stirling Beta e Gama são chamados de motores Stirling de deslocamento, sendo que o gás de trabalho é movimentado entre os espaços de alta e baixa temperatura pelo pistão de deslocamento. A compressão e expansão do gás de trabalho são feitas pelo pistão de trabalho.

4.1.2.1. Motor tipo alfa (α)

O motor Stirling tipo Alfa apresenta basicamente dois pistões, sendo um de compressão e um de expansão, normalmente desfasados de 90° e por isso é também referido como motor tipo V. Mas existem também modelos em que os dois pistões são coaxiais. Há um lado quente (zona de expansão) e um lado frio (zona de compressão), unidos entre si. Os dois pistões fazem o gás fluir entre ambos espaços, e os mesmos dois pistões geram potência útil.

Os dois pistões são conectados em série ao permutador de calor de aquecimento, o regenerador e ao permutador de calor de refrigeração. Embora possua a configuração mais simples, o motor Alfa apresenta a desvantagem de ambos os pistões necessitarem de vedação por conterem gás de trabalho. Esses motores podem ser construídos em configurações compactas, com múltiplos cilindros e elevadas potências de saída, necessárias nas aplicações automóveis.

4.1.2.2. Motor tipo beta (β)

Na configuração Beta, os pistões de deslocamento e de trabalho estão alinhados em um único cilindro. Pela sobreposição entre cada movimento de ambos os pistões, uma taxa de compressão maior do motor é obtida, e pode-se obter maior potência que o motor Stirling tipo Gama. Entretanto, as hastes do pistão de deslocamento e de trabalho estão alinhadas, o que torna o mecanismo complicado.

O motor Beta apresenta a configuração clássica, patenteada em 1816 por Robert Stirling.

4.1.2.3. Motor tipo gama (γ)

Os motores Stirling tipo Gama têm um pistão de deslocamento similar ao Beta, apesar de ser montado em diferentes cilindros. Essa configuração tem o conveniente de separar a parte quente do permutador de calor, que é associada ao pistão de deslocamento, do espaço de trabalho de compressão e expansão, associado ao pistão de trabalho.

Comparado com o motor tipo Beta, o seu mecanismo é mais simples, e os ajustes na taxa de compressão e incremento da área de transferência de calor, são relativamente fáceis de se obter. [2]

Apresenta, entretanto, volumes mortos maiores, além do facto de parte do processo de expansão ocorrer no espaço de compressão, causando redução na potência de saída.

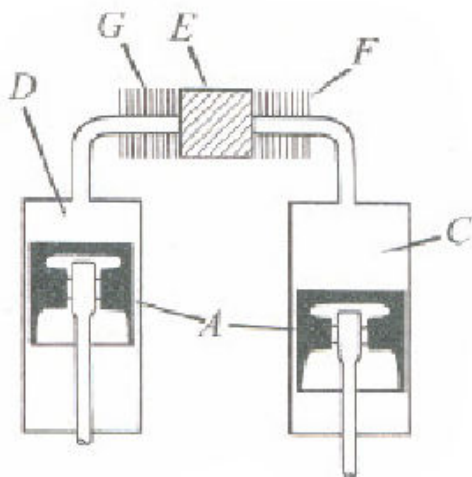


Fig.3. Motor Stirling tipo alfa (α). [6]

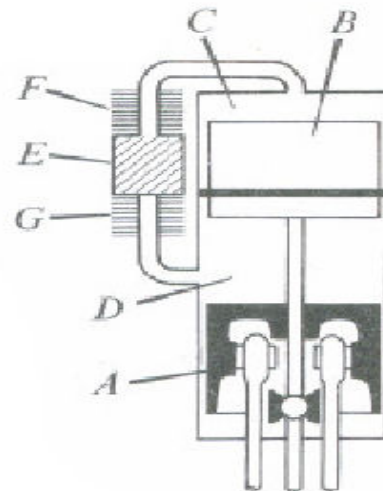


Fig.4. Motor Stirling tipo beta (β). [6]

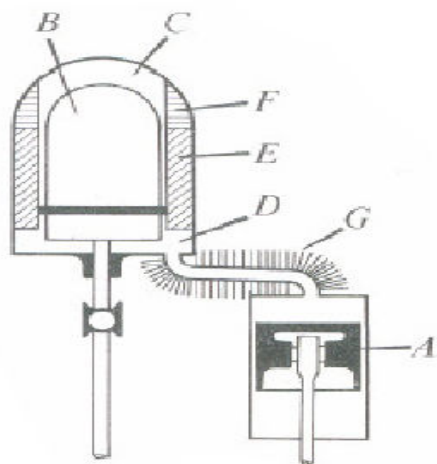


Fig.5. Motor Stirling tipo gama (γ). [6]

Legenda (para as três figuras)

- A- Pistão
- B- Deslocador
- C- Zona de Expansão
- D- Zona de Compressão
- E- Regenerador
- F- Permutador de calor (lado quente)
- G- Permutador de calor (lado frio)

4.1.3. Os componentes do motor Stirling

Embora as peças de um motor Stirling variem conforme o tipo, o princípio básico mantém-se praticamente inalterado. Há um volume (ou dois, conectados - no tipo alfa) o qual contém o fluido de trabalho como o meio de funcionamento que é periodicamente aquecido e refrigerado por uma fonte de calor externa e por um dissipador respectivamente.

O aquecimento e a refrigeração são ajustados pelo pistão de deslocamento ou deslocador (ou pelo pistão do compressor -no tipo alfa), que move o gás para as zonas de aquecimento e refrigeração. Disso resulta uma variação de pressão que conduz o pistão de trabalho. O fluido de trabalho não é alterado durante o processo. Outra parte importante é a roda de inércia, porque à semelhança do ciclo de Carnot, nem todos os processos correm naturalmente, fazendo com que haja a necessidade de se adicionar energia ao motor em alguns processos. O papel do regenerador é absorver (idealmente todo) a quantidade de calor que o gás emite durante o processo isocórico - quarta etapa do ciclo de Stirling ideal, e fornecer calor durante a segunda etapa. O regenerador pode ser, por exemplo, um bloco de aço poroso funcionando também como um pistão deslocador, nas configurações do tipo β e γ .

4.1.4. O ciclo Stirling ideal

Para descrever o processo usar-se-á o tipo gama. O processo ideal de Stirling comporta quatro passos, como já dito anteriormente: dois isotérmicos e dois isocóricos.

1. Sendo a primeira etapa do processo uma compressão isotérmica à temperatura T_c . Para a compressão, o trabalho $W_c = -RT_c \ln\left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}}\right)$ tem de ser feito no motor pela roda de inércia.
2. Enquanto o volume está no mínimo, V_{\min} , o deslocador está numa posição tal que o gás é aquecido da temperatura T_c para T_h e a pressão aumenta consideravelmente. A energia interna aumenta de $\Delta U_1 = c_v(T_h - T_c)$ que provém do fluxo de calor Q_1 saído da fonte de calor.
3. Aqui o pistão de trabalho move-se de tal forma que o volume aumenta de V_{\min} para V_{\max} . Durante esse processo isotérmico à temperatura T_h , o trabalho $W_e = RT_h \ln\left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}}\right)$ é produzido pelo motor.
4. Nesta etapa o pistão deslocador desloca-se provocando a refrigeração do gás de T_h para T_c , baixando assim novamente a pressão enquanto o volume atinge o seu máximo V_{\max} . A energia interna diminui para $\Delta U_2 = c_v(T_c - T_h)$ resultando num fluxo de calor Q_2 .

Durante o processo isocórico vê-se um fluxo extra de calor com $\Delta U_1 = \Delta U_2$. Se fosse possível armazenar este calor durante a quarta etapa do ciclo e reutilizá-lo na segunda, podia-se melhorar a eficiência η do motor de tal modo que esta igualará aquela obtida pelo ciclo de Carnot. Isto pode ser feito por um regenerador.

4.1.5. Princípio de funcionamento e ciclo termodinâmico

O motor Stirling pode não ser tão fácil de ser compreendido, contudo, há pontos-chave que definem esse motor como o que todo o motor Stirling tem um cilindro selado com uma zona quente e outra fria. O fluido de trabalho dentro do motor é deslocado por um mecanismo, do lado quente para o frio. Quando o gás está na região quente, expande-se e empurra o pistão. Quando este último regressa para a região fria o gás contrai-se. Quando correctamente projectados estes motores têm dois pulsos de potência por ciclo, o que pode lhes conferir um funcionamento bastante suave.

O princípio de funcionamento do motor Stirling é completamente diferente dos motores de combustão interna comuns. O gás pressurizado é dito fluido de trabalho no motor Stirling (ar, hélio ou hidrogênio) no cilindro. A potência é gerada não pela queima explosiva de combustível no cilindro, mas pelo aquecimento e refrigeração do gás de trabalho pelo lado de fora do cilindro. O espaço interno do cilindro é preenchido com gás de trabalho. A função do pistão de deslocamento é transferir o gás da câmara quente para a câmara fria e vice-versa, com o objetivo de aumentar ou diminuir a temperatura do gás de trabalho. A mudança na temperatura do gás de trabalho causa uma subsequente mudança na pressão do mesmo, que produz força para movimentar o pistão. [5]

O princípio de funcionamento do motor Stirling é baseado num ciclo fechado, onde o gás de trabalho é mantido dentro dos cilindros e o calor é adicionado e removido do espaço de trabalho através das paredes dos cilindros.

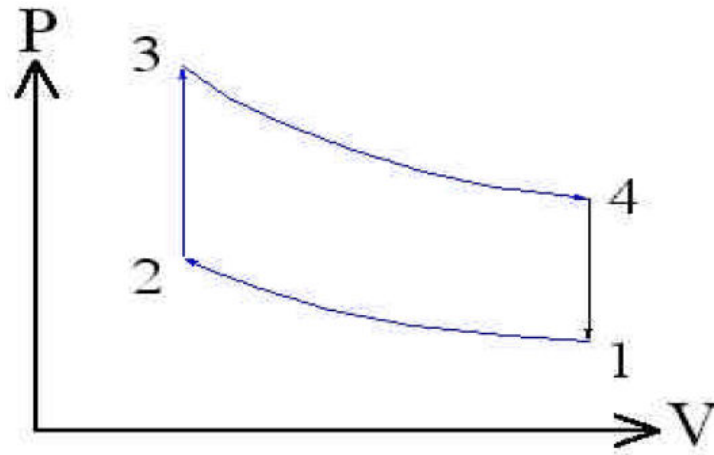
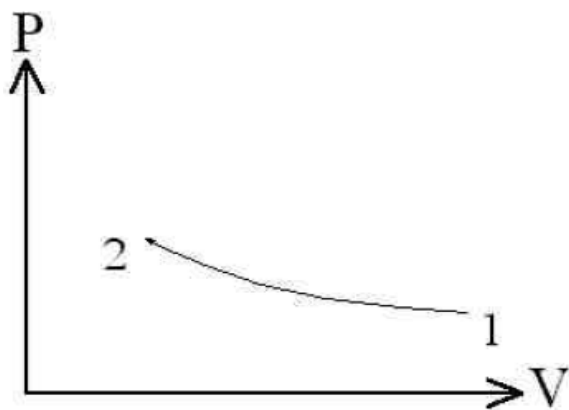


Fig.6. Diagrama PV de um ciclo de Stirling (ideal). [7]

O ciclo é composto por quatro processos termodinâmicos sequenciais (ciclo termodinâmico ideal). Cada fase do ciclo corresponde a uma transformação termodinâmica (processo) do fluido de trabalho (gás). Na realidade as fases não se processam isoladamente, o funcionamento aqui descrito é o teórico.

Como exemplo serão apresentadas as etapas do ciclo para um motor Stirling.



1 → 2 Compressão isotérmica (na qual há também rejeição de calor).
O pistão na zona fria move-se até um ponto intermediário, comprimindo o fluido de trabalho, e o calor produzido pela compressão é simultaneamente removido.

Fig.7 Primeira fase do ciclo Stirling [7]

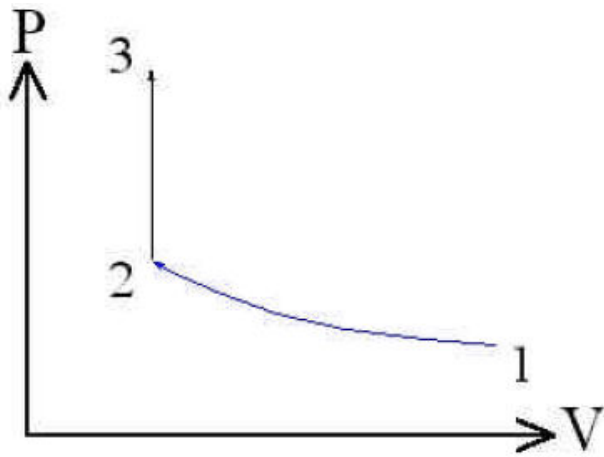


Fig.8. Segunda fase do ciclo Stirling [7]

2 \rightarrow 3 Calor é transferido ao fluido de trabalho a volume constante.

O pistão da zona fria continua o seu movimento, do ponto intermediário até ao fim, enquanto o pistão do lado quente desce até um ponto médio do seu curso, fazendo com que o gás atravesse o regenerador. Passando pelo regenerador, o gás sofre um aumento de temperatura, pois o regenerador está a uma temperatura maior do que na zona fria. Com o volume constante este acréscimo na temperatura causa um aumento da pressão.

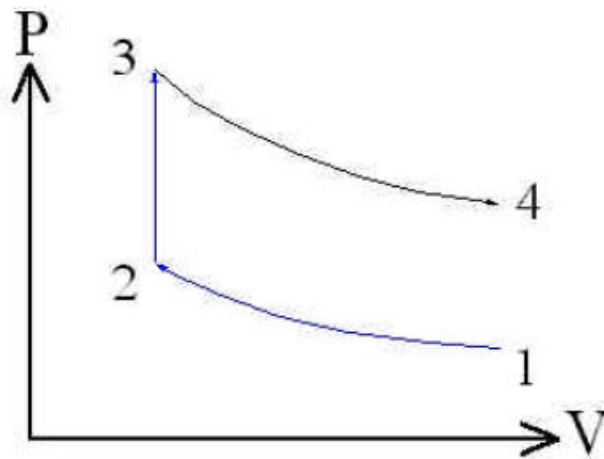


Fig.9 Terceira fase do ciclo Stirling [7]

3 \rightarrow 4 Expansão isotérmica (há também transferência de calor ao fluido de trabalho).

O gás é aquecido através de uma fonte de calor externa de temperatura e se expande. A expansão impulsiona o pistão na zona quente até a posição correspondente ao volume máximo

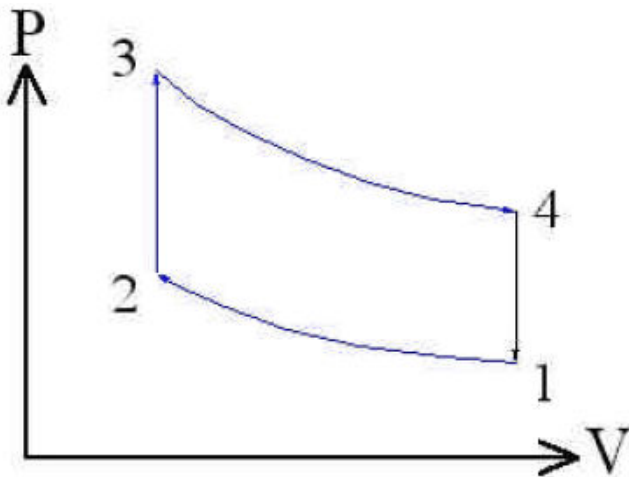


Fig.10, Quarta fase do ciclo Stirling [7]

4 → 1 Calor é rejeitado a volume constante. O pistão quente retorna até a posição de volume mínimo, enquanto simultaneamente, o pistão na zona frio move-se até a zona de volume máximo quando o gás passa novamente pelo regenerador e liberta aí o calor que será usado posteriormente na fase dois. Esta transformação é a volume constante o que causa uma queda de pressão do gás. É esta a fase que completa o ciclo.

Se um regenerador for colocado no canal entre os cilindros frio e quente, o calor pode ser armazenado, quando o gás flui do cilindro quente para o frio e usado para reaquecer o gás, quando este flui de volta para o volume quente. O ciclo de Stirling, tendo um regenerador ideal (eficiência de 100%), terá todo o calor fornecido ao fluido de trabalho de fontes externas no processo isotérmico 3-4 e todo o calor rejeitado para as vizinhanças no processo isotérmico 1-2. Portanto, a eficiência térmica do ciclo Stirling, neste caso será dada pela mesma expressão do ciclo de Carnot. [5]

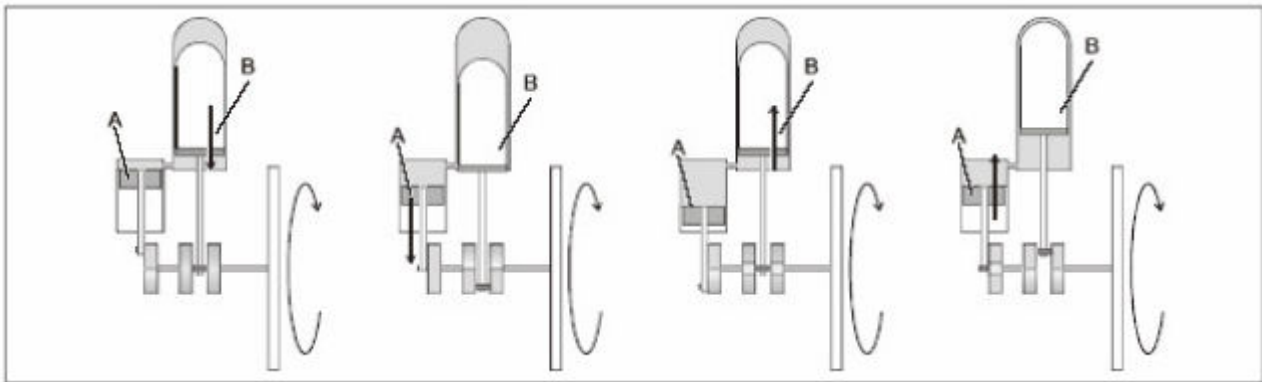
4.1.6. Esquema de funcionamento

O ciclo de Stirling envolve uma série de etapas que mudam a pressão do gás dentro do motor, fazendo com que realize trabalho. O princípio chave dum motor de Stirling é que uma quantidade fixa de um gás está selada dentro do motor. Embora, os fundamentos básicos do sistema de Stirling sejam similares a um motor de combustível convencional, há algumas diferenças importantes entre eles.

Há um gás hermeticamente selado na zona de trabalho do motor. Este gás não troca calor com a vizinhança (o ciclo é fechado) ao contrário do motor do combustível convencional. O gás não muda o seu estado.

O gás é transferido ao *heater* onde é aquecido. O processo de refrigeração usa o mesmo princípio que o anterior mas é feito no refrigerador (*cooler*). O gás é transferido de uma zona para outra (zona quente e zona fria). Durante o seu movimento a capacidade de trabalho total do motor não é alterada. O pistão de trabalho é dirigido pela compressão e pela expansão.

Durante cada volta da cambota há um ciclo de compressão, de aquecimento, de expansão e de refrigeração. A peça importante do motor é o regenerador. Localiza-se entre a zona quente e a zona fria e no qual o gás deve atravessar. Quando o gás passa pelo lado frio, o regenerador remove calor nele contido. Assim, a energia, em forma de calor não é perdida. O regenerador aumenta a eficiência do motor de Stirling.



Esquemática do funcionamento de um motor Stirling. [12]

O primeiro esquema representa a situação onde o pistão de deslocamento se move da extremidade quente para a extremidade fria, empurrando o ar frio desta extremidade para a extremidade quente. Durante este processo o pistão que realiza trabalho mecânico encontra-se próximo da posição de volume mínimo, e o ar neste pistão é aquecido e a pressão aumenta. Segue-se a expansão do ar quente no pistão mecânico, que por sua vez corresponde ao pistão de deslocamento na extremidade fria (o ar do pistão de deslocamento foi empurrado para a extremidade quente e está a ser aquecido, por forma a trocar calor com a fonte quente). O terceiro esquema corresponde ao pistão mecânico na posição de volume máximo (e o pistão de deslocamento a meio caminho da extremidade quente). Nesta fase do ciclo pV , o ar no pistão mecânico é arrefecido à volume essencialmente constante, levando a um decréscimo de pressão – processo isocórico. O pistão de deslocamento está a empurrar o ar da extremidade quente para a extremidade fria. O último troço do ciclo consiste na compressão isotérmica do ar no cilindro mecânico, ao mesmo tempo que o pistão de deslocamento se encontra na extremidade quente (o ar do pistão de deslocamento foi empurrado para a extremidade fria e está a arrefecer - troca de calor com o reservatório).

5. REGENERADORES

5.1. Introdução

Um regenerador é um dispositivo que consiste em um pacote de lã de aço ou de uma série de chicanas, cuja condutividade térmica é suficientemente baixa para manter a diferença de temperatura entre as extremidades fria e quente sem que se produza condução de calor apreciável.

[14]

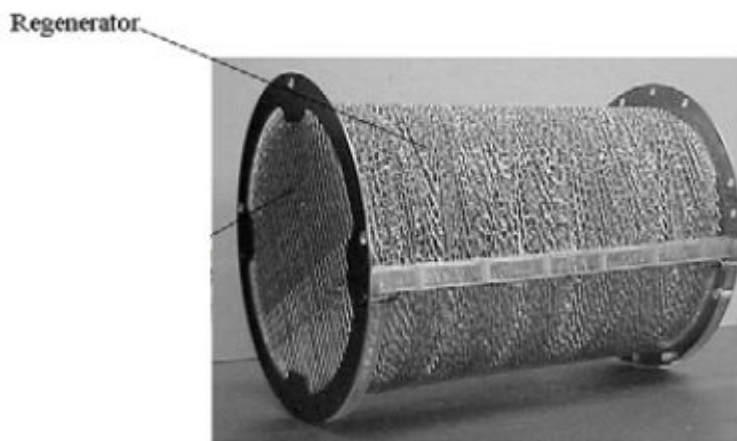


Fig. 11. Regenerador para um motor Stirling. [12]

A regeneração é uma tecnologia que data das primeiras lareiras abertas e fogões do tipo alto-forno. A escalada drástica dos preços da energia, fundamentalmente desde as duas décadas passadas fez da área científica de recuperação de calor mais atractiva. Os processos industriais de fabricação, tais como o do vidro, do cimento, metais primários e secundários, etc. absorvem uma fracção bastante significativa de toda a energia consumida. Muita desta energia é dispendida com os gases de exaustão, que ainda se encontram a uma energia térmica consideravelmente alta. A recuperação da energia proveniente do escoamento do ar quente vem melhorar a eficiência e serve para reduzir a demanda energética, por forma também a conservar os combustíveis fósseis.

Um regenerador consiste numa matriz na qual passam o escoamento do fluido quente e o escoamento do fluido frio, periodicamente e alternadamente. Primeiro o fluido que está quente passa pelo regenerador deixando grande parte da sua energia térmica. Daí o fluido frio escoar pela mesma passagem, absorvendo o calor deixado anteriormente. A passagem do escoamento do fluido quente através da matriz é denominada *hot blow* e do fluido frio *cold blow*. Assim, por reversões regulares, a matriz é exposta alternadamente aos escoamentos quente e frio do fluido, e a temperatura do

envólucro e do fluido em cada posição, muda com o tempo. Sob as condições de estado estacionário de funcionamento, um número de ciclos após o começo de operação do regenerador, uma condição de equilíbrio cíclico é alcançada onde as variações de temperatura com o tempo são as mesmas durante ciclos sucessivos e os períodos de hot blow e cold blow devem garantir tempo suficiente para absorver e libertar calor.

Daqui, os regeneradores distinguem-se dos recuperadores. No caso dos recuperadores, a transferência de calor ocorre entre dois escoamentos através de alguma fronteira fixa, e as condições em qualquer ponto dependem, durante a operação num estado estacionário, simplesmente da posição desse ponto, visto que no caso dos regeneradores, o transporte de calor é transiente e as condições dependem da posição e do tempo.

5.2. Tipo de regeneradores

Desde que a matriz seja aquecida alternadamente pelo gás quente e arrefecida pelo líquido frio, tanto a matriz deve permanecer estacionária e os escoamentos do gás atravessam-na alternadamente ou a matriz deve ser rodada entre as passagens do gás quente e frio. Daqui o regenerador pode ser classificado de acordo com sua posição com respeito ao tempo como (1) os de matriz-fixa ou fixed-bed e (2) regeneradores rotativos.

5.2.1. Regeneradores de matriz fixa

Os regeneradores de matriz fixa são o tipo de permutadores de calor com uma matriz de alta capacidade térmica, cujo escoamento tem características pulsantes, através da qual o escoamento do fluido quente e o fluido frio atravessam-no alternadamente. Para alcançar o fluxo contínuo, pelo menos duas matrizes são necessárias. O fluxo do fluido de trabalho através da matriz é controlado, nalguns casos, por válvulas. De acordo com o número de matrizes empregadas, os regeneradores de matriz fixa são classificados em duas categorias: (1) “*single bed*”, e (2) “*dual bed valved*”.

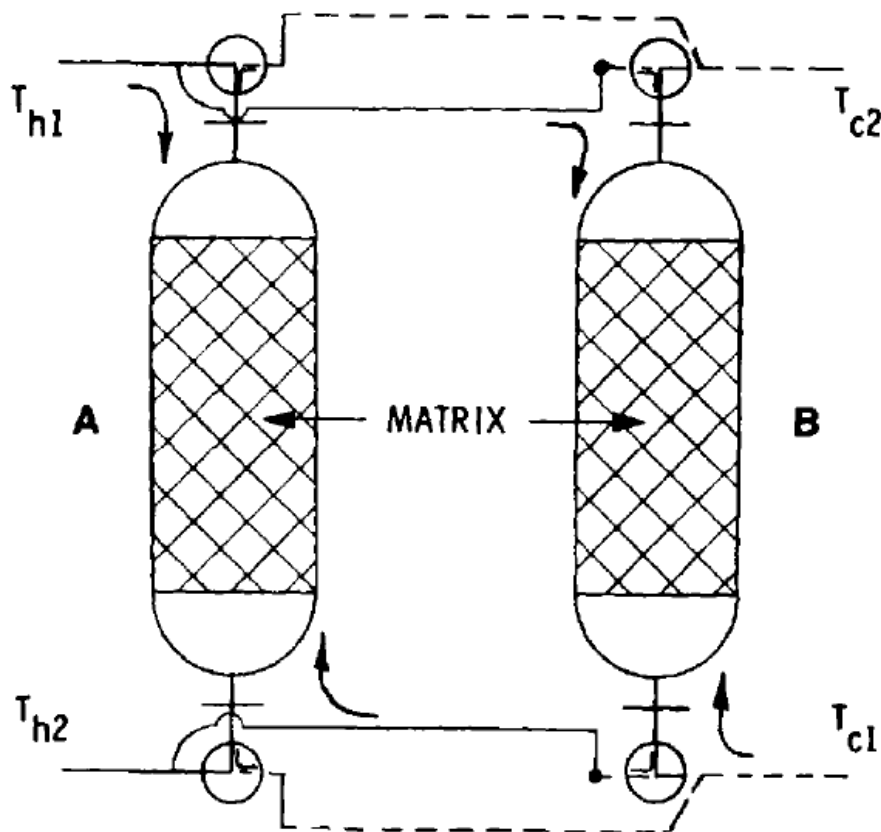


Fig.12. Regenerador de matriz fixa tipo *dual bed valved* . [9]

5.2.2. Regeneradores rotativos

O regenerador rotativo da figura 13 consiste numa matriz rotativa, através da qual o gás quente e frio a atravessam continuamente. Este tipo de regenerador é também chamado permutador de calor de fluxo periódico uma vez que cada parte da matriz, devido à sua contínua rotação, está exposta a um fluxo periódico dos escoamentos de gás quente e frio. O princípio da regeneração rotativa é alcançado por dois meios: (1) o fluxo através da matriz é periodicamente invertido pela rotação da matriz, e (2) a matriz é estacionária e o que gira é o invólucro no qual ela está inserida. Ambas as abordagens são rotativas, porque para qualquer uma delas, o desempenho de transferência de calor, da queda de pressão, escoamento e considerações são as mesmas. Os exemplos para regeneradores rotativos são: (1) o tipo Rothemuhle e (2) o tipo Ljungstrom [9]. Nos do tipo Rothemuhle, o invólucro gira durante o processo de transferência de calor, enquanto a matriz se mantém inalterada da sua posição, ao passo que nos regeneradores do tipo Ljungstrom é unicamente a matriz que altera continuamente a sua posição angular. Uma aplicação dos regeneradores rotativos é em motores de turbina de gás veicular e como um desumidificador em aplicações em sistemas de ar condicionado.

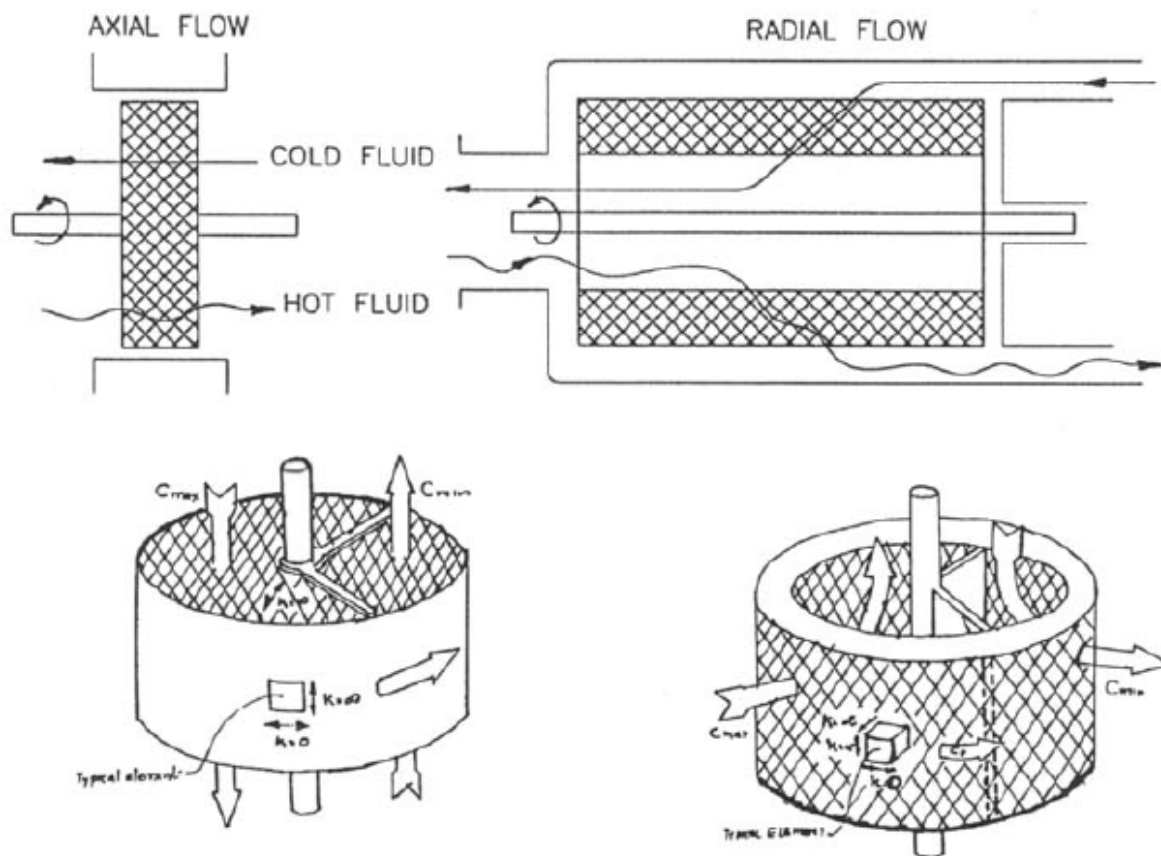


Fig.13. Regeneradores rotativos [9]

5.3. Materiais usados em projecto de regeneradores

Alguns dos materiais usados em regeneradores, tendo em conta a gama de temperaturas a serem utilizados e o processo a que se destinam são:

1. Em aplicações de processos de ar-condicionado e processos industriais de recuperação de calor-regeneradores rotativos são feitos de malha de alumínio ou em matriz de aço inoxidável.
2. Em processos criogénicos, em que os aços carbono tornam-se frágeis, de forma que materiais como aços inoxidáveis austeníticos, ligas de cobre, certas ligas de alumínio, níquel, titânio e alguns outros metais que conservam a ductilidade em temperaturas criogénicas devem ser usados. [9]
3. Plásticos, papel e lã são utilizados em regeneradores que operam abaixo de temperaturas à volta de 65°C (150°F). [9]

5.4. Regenerador Cowper

Os regeneradores tipo Cowper operam de maneira alternada, em média durante 120 minutos dois regeneradores estão em aquecimento, a queimar o gás de mistura (GMX) e um terceiro regenerador que vai operar durante os 60 minutos seguintes.

Com o regenerador a pressão atmosférica inicia-se o ciclo de aquecimento, em que cada regenerador possui uma ventoinha que fornece GMX para a combustão, este se inflama na câmara de combustão formando um fluxo de gás que vai para o regenerador, dirigindo-se a câmara de empilhamento, onde de acordo com a geometria dos tijolos, o fluxo de gás divide-se pelas diversas veias gasosas, ao longo dos quais o gás transfere a sua energia térmica, e chega quase sem energia para ceder quando alcança o suporte do empilhamento.

O regenerador é considerado aquecido quando atinge a temperatura estipulada. Após o aquecimento o regenerador é isolado e pressurizado a aguardar pelo momento de entrar no circuito para fazer o aquecimento do ar frio, que faz o percurso inverso do gás (no período de aquecimento), aquecendo-se ao passar pela câmara de empilhamento.

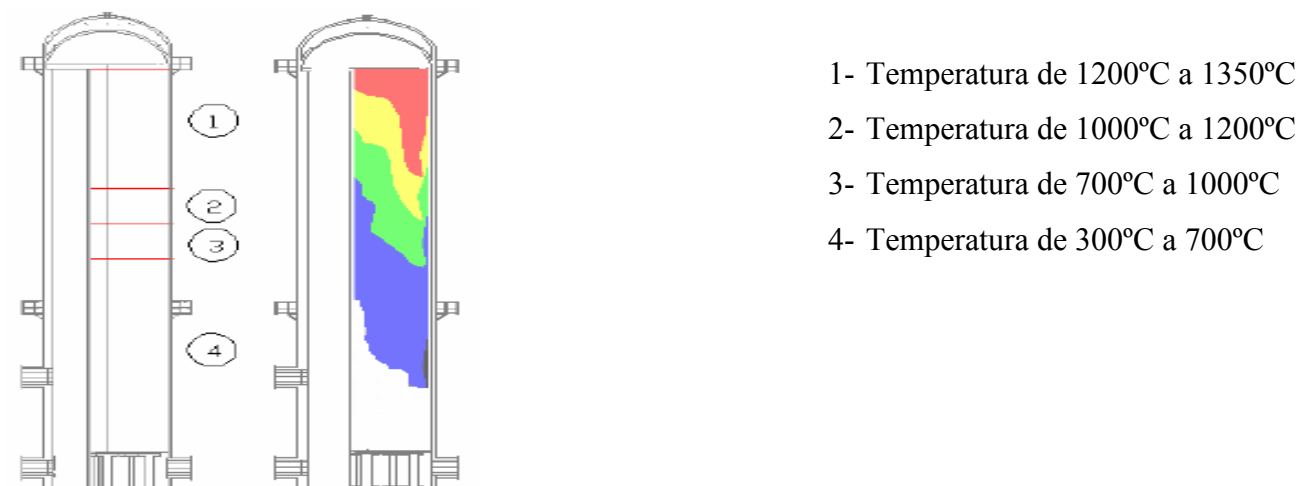


Fig. 14. Regenerador Cowper[10]

5.5. Temperatura média efectiva do regenerador

A fim de avaliar correctamente a massa total de gás no espaço vazio do regenerador, deve ser conhecida a distribuição da temperatura do gás ao longo do regenerador. Foi demonstrado que para

um regenerador real, o perfil de temperaturas é aproximadamente linear, deste modo, assume-se que o perfil de temperaturas de um regenerador ideal tem um perfil linear, entre a temperatura fria temperatura T_k e à temperatura quente T_h .

$$T_r = (T_h - T_k) / \ln(T_h / T_k) \quad (1)$$

$$T(x) = (T_h - T_k)x / L_r + T_k \quad (2)$$

$$m_r = \int_0^{V_r} \rho dV_r \quad (3)$$

Onde:

ρ é a densidade e $V_r = ArL_r$.

Substituindo para a equação do gás ideal $p = \rho RT$ na equação (3) e simplificando

$$m_r = \frac{V_r p}{R} \int_0^{L_r} \frac{1}{[(T_h - T_k)x + T_k L_r]} dx \quad (4)$$

Integrando o lado direito e simplificando vem:

$$m_r = \frac{V_r p}{R} \frac{\ln(T_h / T_k)}{(T_h - T_k)} \quad (5)$$

Defini-se a temperatura média do regenerador T_r , em termos da equação do gás ideal:

$$m_r = V_r p / (RT_r) \quad (6)$$

Comparando as duas últimas equações (5) e (6) obtemos:

$$T_r = (T_h - T_k) / \ln(T_h / T_k) \quad (7)$$

A equação (11) dá-nos a temperatura efectiva do regenerador T_r em função de T_k e T_h .

6. MÉTODO EXPERIMENTAL

6.1. Metodologia

Os parâmetros principais a serem analisados em projectos de regeneradores são os que se seguem nos pontos.

- Cálculo do calor transferido

$$\dot{Q}_{transf.} = \frac{V \rho c_p}{t} (T_{out} - T_{in})$$

- Cálculo da temperatura média do regenerador

$$T_r = \frac{(T_h - T_k)}{\ln(T_h/T_k)}$$

- Distribuição de temperatura ao longo do regenerador

$$T(x) = \frac{(T_h - T_k)x}{L_r} + T_k$$

6.2. Material usado

Instrumentos de medição.

Proveta- V=100mL; Termómetro; Cronómetro- resolução 0,01



Fig.15. Malha em aço porosa (material1)

Materiais no regenerador

$$m_{regenerador} = 1028,77g$$

$$m_{(material1)} = 28,67g$$

$$m_{(material2)} = 13,78g$$

$$m_{(material3)} = 17,96g$$



Fig.16. Lã de aço (material2)



Fig.17. Malha esponjosa espessa (material3)

6.3. Equipamento



Fig.18. Fonte de tensão



Fig.19. Variador de frequência

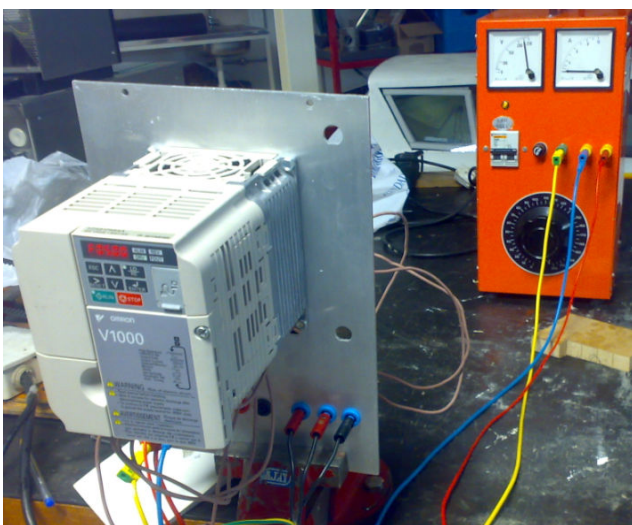


Fig. 20. Ligação Fonte- Variador



Fig. 21. Banho termostático

6.4. Lay- out da experiência



Fig.22. Montagem da experiência

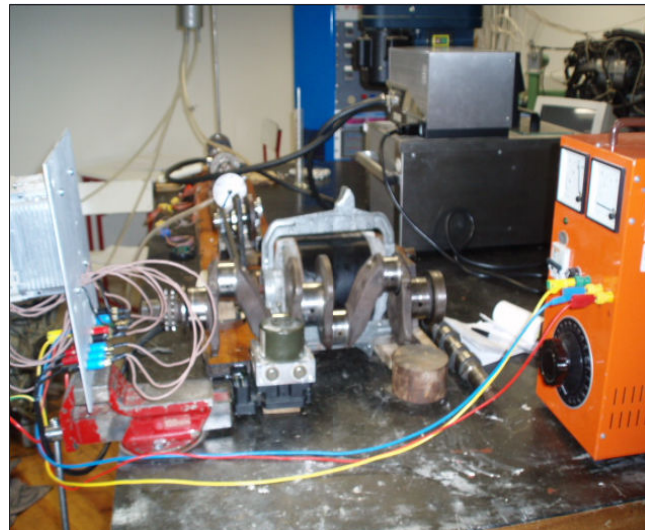


Fig.23. Montagem da experiência



Fig. 24. Montagem da experiência

6.5. Procedimento experimental

Monitorizou-se a temperatura desejada no banho termostático e abriu-se a torneira a uma medida previamente estipulada. Atingida a temperatura no banho termostático, ligou-se a fonte e o variador na frequência correspondente ao estudo que se pretende fazer.

Cronometrou-se um tempo de 2min30 antes de se fazer a leitura das temperaturas correspondentes a cada um dos termopares dispostos ao longo do regenerador e da água que sai da fonte fria, que é vertida para a proveta graduada, perfazendo o volume de 100mL.

7. RESULTADOS OBTIDOS/ DISCUSSÃO

Tabela 1 Material 1 $f=5\text{Hz}$

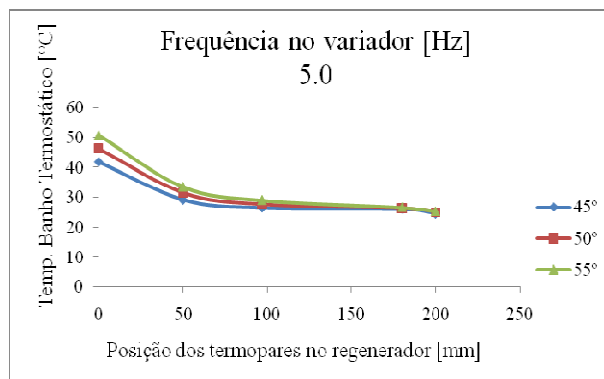
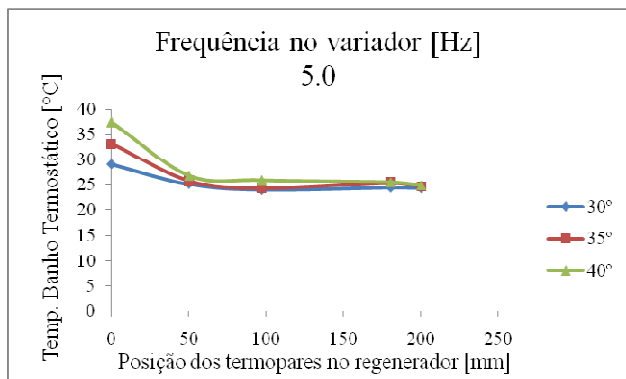
$T_{\text{banho termostático}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{in}}(\text{H}_2\text{O}) [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{out}}(\text{H}_2\text{O}) [^{\circ}\text{C}]$	Tempo[s]	$\dot{Q}_{\text{transferido}} [\text{W}]$	$T_{\text{med.regenerador}} [^{\circ}\text{C}]$
30	24.1	24.2	10.13	4.13	26.7
35	24.1	24.8	9.72	30.1	28.7
40	24.1	24.8	11.0	26.6	30.8
45	24.1	24.8	9.54	30.7	32.4
50	24.1	24.7	11.23	22.3	34.6
55	24.1	24.8	9.61	30.4	36.5
60	24.1	25.0	10.89	34.5	38.5
65	24.1	25.0	10.90	34.5	40.7
70	24.1	24.9	10.44	32.0	41.4
75	24.1	24.9	10.42	32.1	43.2
80	24.1	24.8	10.38	28.2	44.8
85	24.1	25.0	11.16	33.7	47.4

Tabela 2 Material 1 $f=10\text{Hz}$

$T_{\text{banho termostático}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{in}}(\text{H}_2\text{O}) [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{out}}(\text{H}_2\text{O}) [^{\circ}\text{C}]$	Tempo[s]	$Q_{\text{transferido}}$	$T_{\text{med.regenerador}} [^{\circ}\text{C}]$
30	24.1	25.0	18.37	20.5	27.2
35	24.1	25.0	12.76	29.5	29.4
40	24.1	25.0	12.09	31.1	31.6
45	24.1	25.1	18.41	20.4	33.7
50	24.1	25.1	11.23	22.3	35.6
55	24.1	25.2	11.38	40.4	37.6
60	24.1	24.8	12.41	33.7	38.0
65	24.1	24.9	16.80	27.4	39.3
70	24.1	24.9	17.70	26.0	41.7
75	24.1	25.0	17.74	28.3	44.0
80	24.1	25.1	15.50	35.1	45.6
85	24.1	25.2	11.42	51.2	46.4

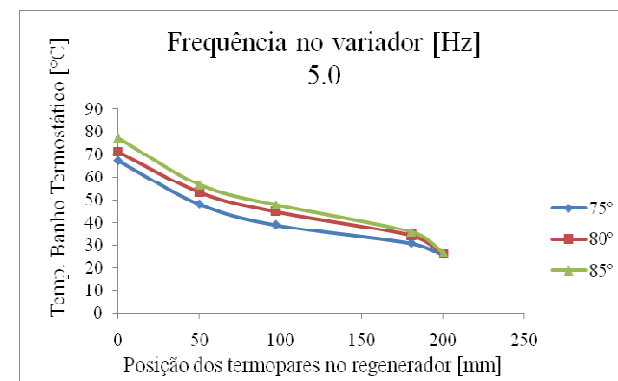
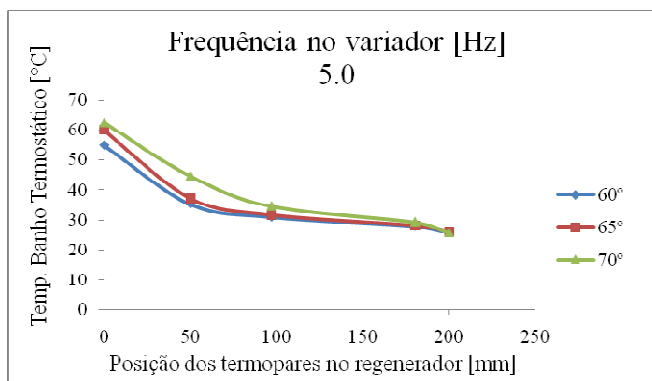
Tabela 3 Material 1 f=15Hz

$T_{\text{banho}}^{\text{termostático}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{in}}(\text{H}_2\text{O}) [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{out}}(\text{H}_2\text{O}) [^{\circ}\text{C}]$	Tempo[s]	$\dot{Q}_{\text{transferido}}$	$T_{\text{med.regenerador}} [^{\circ}\text{C}]$
30	24.3	25.0	11.50	21.8	27.3
35	24.3	25.0	12.24	22.2	29.2
40	24.3	25.0	11.90	21.1	30.4
45	24.3	25.1	9.62	47.8	32.7
50	24.3	25.1	11.08	64.1	34.9
55	24.3	25.2	11.50	58.2	36.4
60	24.3	25.0	12.50	33.4	37.8
65	24.0	24.8	11.03	30.3	40.1
70	24.0	25.0	11.66	21.1	42.1
75	24.0	26.4	11.99	83.7	43.0
80	24.0	25.9	11.50	69.1	45.5
85	24.0	25.6	11.91	56.2	47.4



(a)

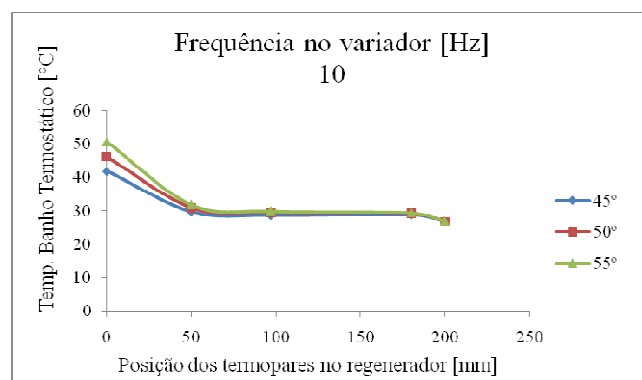
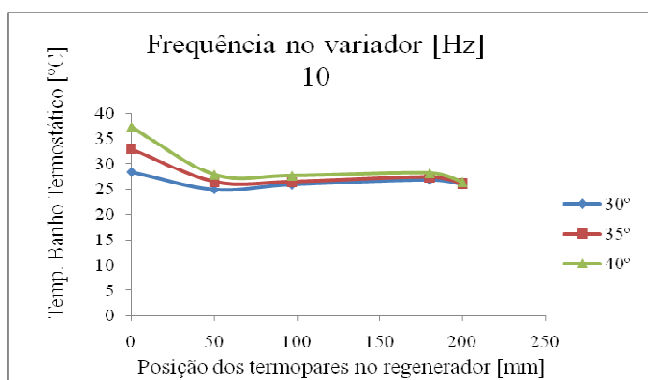
(b)



(c)

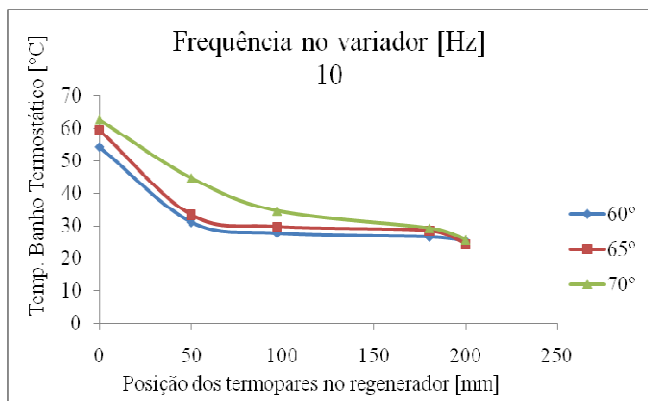
(d)

Fig. 25. Curvas dos ensaios com ao regenerador com material 1 e $f=5\text{Hz}$

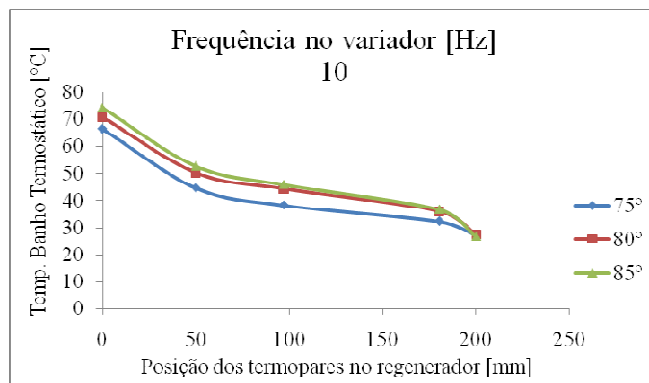


(a)

(b)

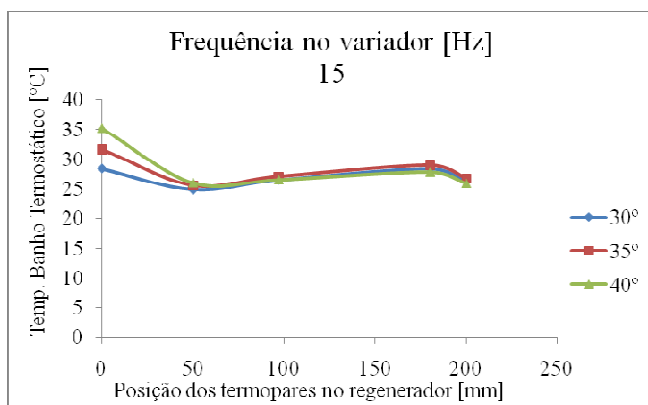


(c)

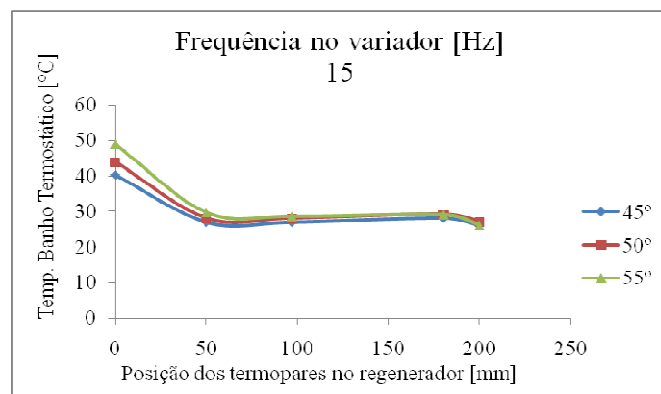


(d)

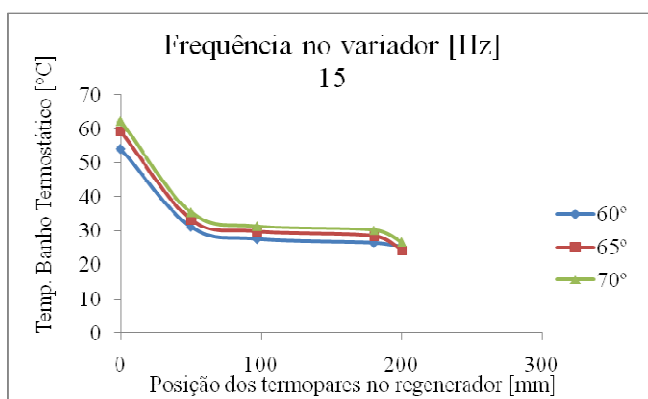
Fig. 26. Curvas dos ensaios com ao regenerador com material 1 e $f=10\text{Hz}$



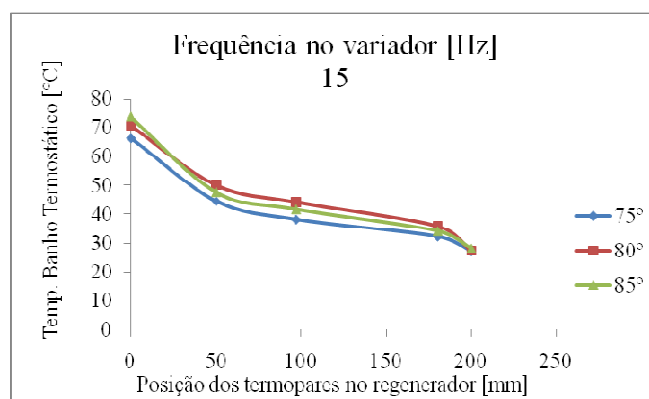
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 27. Curvas dos ensaios com ao regenerador com material 1 e $f=15\text{Hz}$

Verifica-se que para o estudo do regenerador com este material, independentemente da frequência seleccionada no variador, o que ressalta com maior ênfase é o facto de a temperatura ao longo do regenerador se manter quase inalterada a partir do segundo termopar, sendo que as temperaturas a que se faz referência para o gráfico com as temperaturas (30°, 35° e 40°) são 25,2; 25,9; e 26,9 respectivamente, fazendo assim a maior diferença de temperatura (entre os 30° e 40°) de 0,7°C. Para os restantes dois gráficos, correspondentes as curvas das temperaturas de 60° à 85°, nota-se que a diferença entre as temperaturas que se registam a entrada do regenerador (temperatura T3) e as que se registam nos termopares seguintes, é cada vez maior, porquanto que já no penúltimo termopar, no caso mais evidente do último gráfico, esta diferença é ainda mais acentuada com uma descida abrupta da temperatura.

Tabela 4 Material 2 f=5Hz

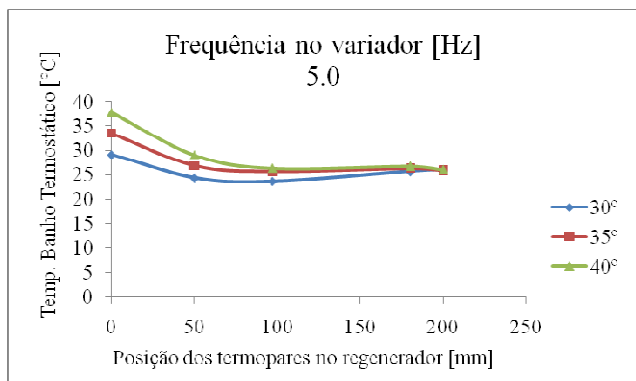
T_{banho} <i>termostático</i> [°C]	$T_{in}(H_2O)$ [°C]	$T_{out}(H_2O)$ [°C]	Tempo[s]	$\dot{Q}_{transferido}$ [W]	$T_{med.regenerador}$ [°C]
30	24.1	24.2	14.75	48,2	27.6
35	24.3	24.8	11.61	54,0	29.5
40	24.4	24.8	12.3	50,9	31.6
45	24.3	24.8	11.47	91,1	34.0
50	24.5	24.7	11.70	92,9	36.2
55	24.4	24.8	9.02	125,1	38.2
60	24.2	25.0	10.12	119,8	39.9
65	24.6	25.0	13.90	72,2	41.1
70	24.3	24.9	10.17	123,3	43.4
75	24.4	24.9	14.47	32.1	44.9
80	-----	-----	-----	-----	-----
85	-----	-----	-----	-----	-----

Tabela 5 Material 2 f=10Hz

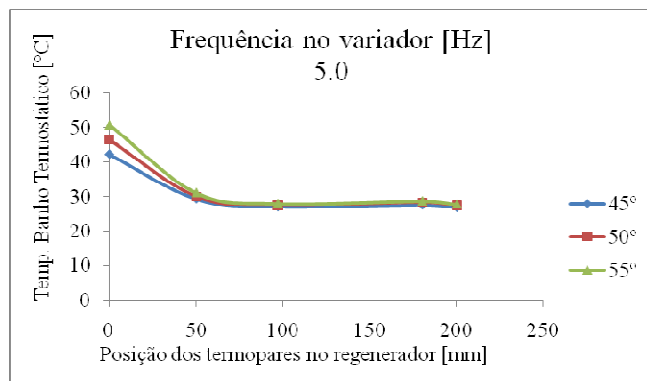
T_{banho} termostático [°C]	$T_{in}(H_2O)$ [°C]	$T_{out}(H_2O)$ [°C]	Tempo[s]	$\dot{Q}_{transferido}$ [W]	$T_{med.regenerador}$ [°C]
30	-----	-----	-----	-----	-----
35	25.7	25.9	17.43	4.80	30.4
40	25.7	26.0	16.94	7.40	32.5
45	25.6	26.0	16.93	9.88	34.6
50	25.0	25.8	17.06	19.6	36.3
55	25.2	25.9	17.57	16,7	38.3
60	26.1	26.6	17.51	11,9	40.3
65	26.6	27.0	17.37	9.63	42.4
70	26.8	26.8	17.32	0	44.4
75	26.1	26.5	17.14	9.75	45.8
80	26.0	26.4	17.17	9.74	47.5
85	26.0	26.5	15.77	13.3	49.0

Tabela 6 Tabela 5 Material 2 f=15Hz

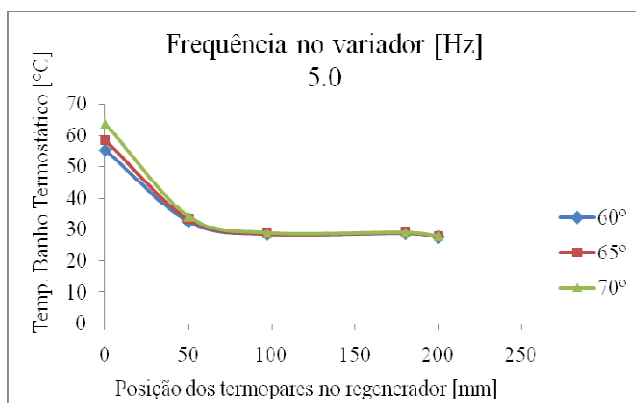
T_{banho} termostático [°C]	$T_{in}(H_2O)$ [°C]	$T_{out}(H_2O)$ [°C]	Tempo[s]	$\dot{Q}_{transferido}$	$T_{med.regenerador}$ [°C]
30	-----	-----	-----	-----	-----
35	25.9	26.8	14.80	25.4	32.2
40	25.8	27.2	10.26	57.0	33.9
45	25.8	26.3	12.88	16.2	36.3
50	25.8	26.4	9.75	25.7	41.1
55	-----	-----	-----	-----	-----
60	25.7	26.2	14.25	14.7	47.5
65	25.2	26.1	10.69	35.2	50.0
70	25.8	26.2	10.57	15.8	52.4
75	26.2	26.7	10.21	20.5	54.6
80	26	26.5	9.71	21.5	56.3
85	-----	-----	-----	-----	-----



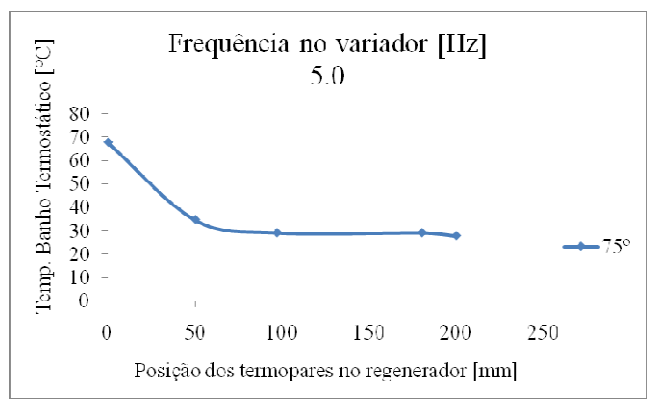
(a)



(b)

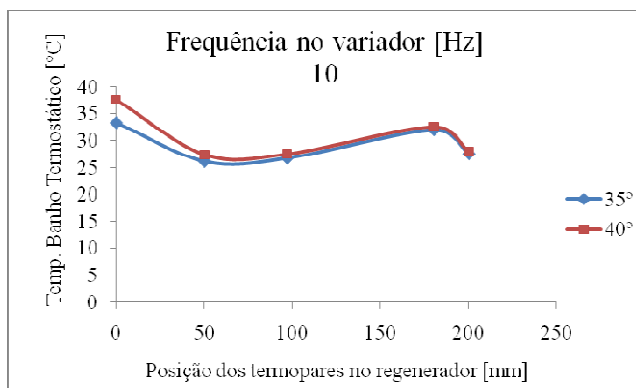


(c)

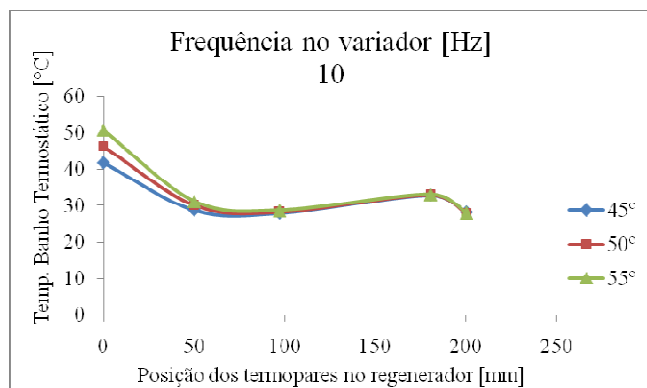


(d)

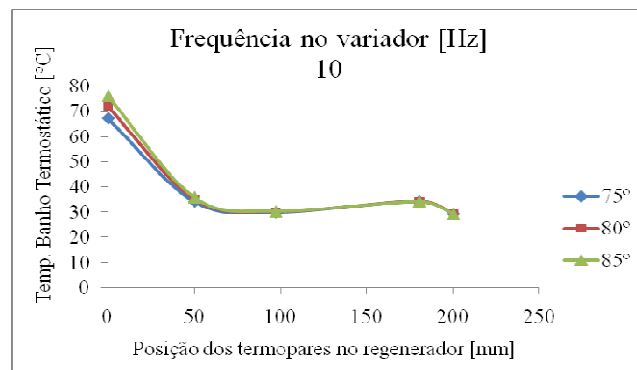
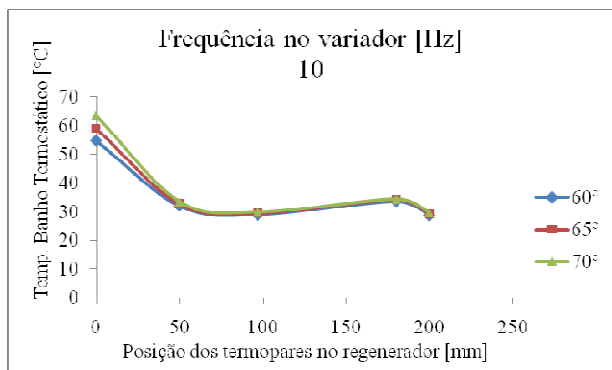
Fig.28. Curvas dos ensaios com ao regenerador com material 2 e f=5Hz



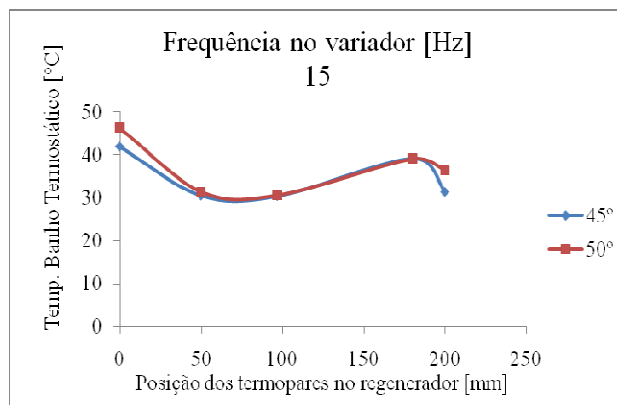
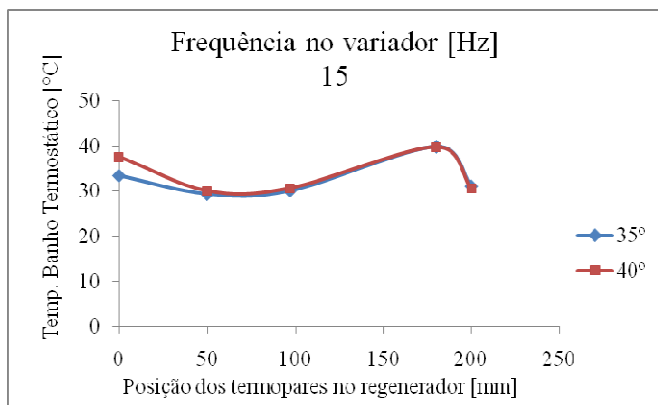
(a)



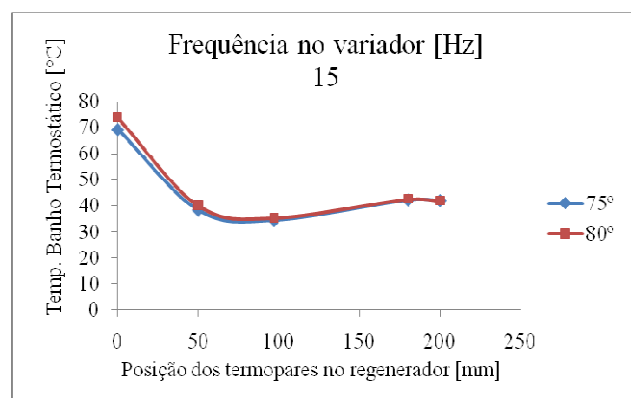
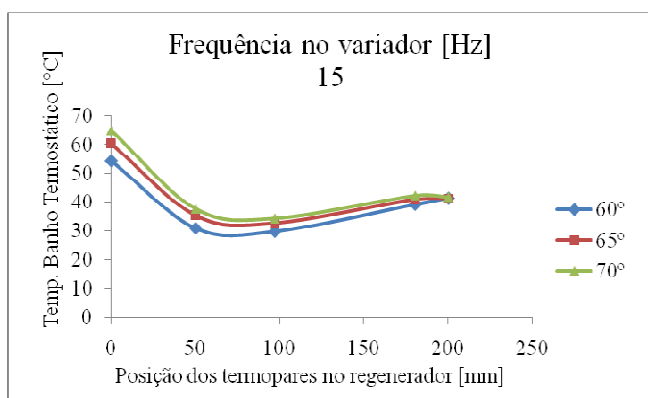
(b)



(c) (d)
Fig.29. Curvas dos ensaios com ao regenerador com material 2 e $f=10\text{Hz}$



(a) (b)



(c) (d)
Fig. 30. Curvas dos ensaios com ao regenerador com material 2 e $f=15\text{Hz}$

Para os gráficos da figura 28, é de salientar que a temperatura ao longo do regenerador estabilizou muito rapidamente, principalmente a partir do momento em que no banho termostático programou-se temperaturas acima dos 40°C.

Para os 10Hz, é bastante nítido o ponto de inflexão nas curvas que deve-se principalmente ao facto de se aumentar o processo de condução de calor ao longo do regenerador e de que a lã de aço consegue conservar melhor o calor no miolo do regenerador.

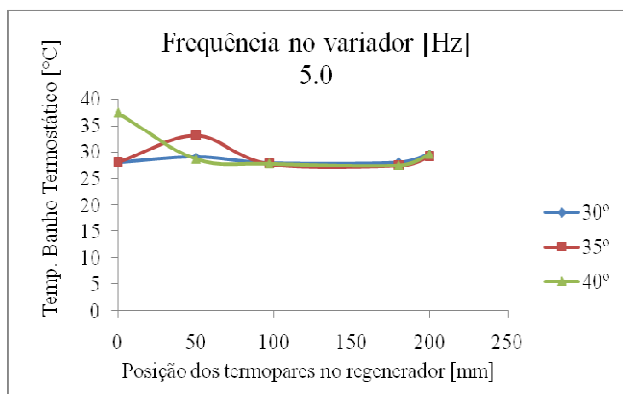
Para a frequência mais alta no alternador, verifica-se o mesmo que para 10Hz, só que de uma forma mais acentuada principalmente para os dois primeiros gráficos, sendo que para o último gráfico desta série, a temperatura no último termopar nas duas curvas, já tendem a igualar a temperatura do penúltimo.

Tabela 7 Material 3 f=5Hz

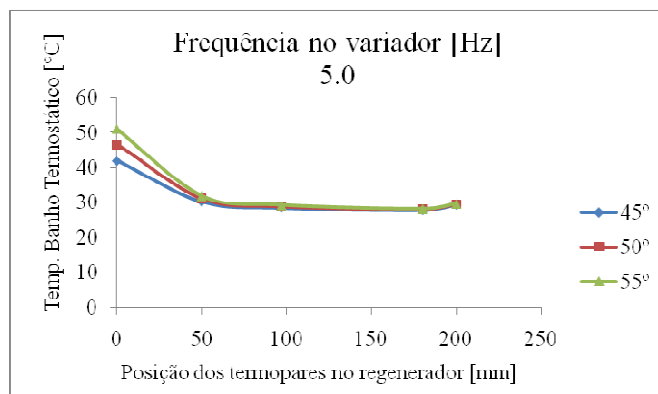
$T_{banho\ termostático}$ [°C]	$T_{in}(H_2O)$ [°C]	$T_{out}(H_2O)$ [°C]	Tempo[s]	$\dot{Q}_{transferido}$ [W]	$T_{med.regenerador}$ [°C]
30	25.9	26.2	15.65	8.01	28.9
35	25.9	26.0	9.43	4.43	28.6
40	25.9	25.9	10.10	0	33.4
45	25.6	25.8	9.66	8.65	35.2
50	25.5	25.7	9.97	8.39	37.4
55	25.8	26.0	10.18	8.21	39.3
60	26.3	26.6	21.56	5.82	40.7
65	26.1	26.4	22.67	5.53	43.0
70	26.1	26.4	20.58	6.09	44.9
75	26.0	26.3	18.53	6.77	46.4
80	26.0	26.1	20.97	1.99	48.1
85	26.7	27.0	21.17	5.92	50.2

Tabela 8 Material 3 f=10Hz

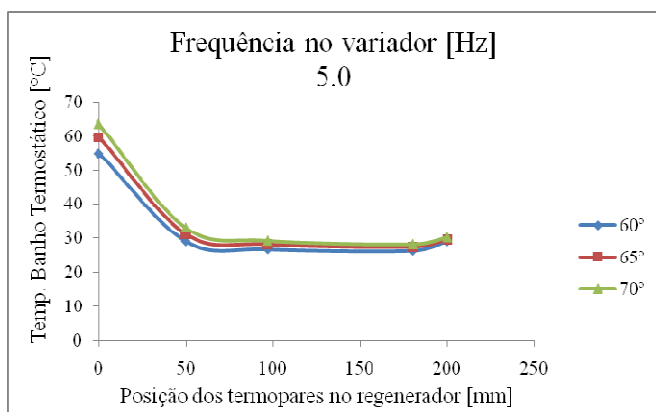
$T_{banho\ termostático}$ [°C]	$T_{in}(H_2O)$ [°C]	$T_{out}(H_2O)$ [°C]	Tempo[s]	$\dot{Q}_{transferido}$ [W]	$T_{med.regenerador}$ [°C]
30	26.8	27.0	8.57	9,80	33.8
35	26.5	26.8	6.96	18.0	35.6
40	26.1	26.2	8.44	5.00	38.5
45	26.1	26.6	8.94	23.4	40.8
50	27.0	27.2	8.41	9,90	43.1
55	27.8	27.8	8.07	0	45.1
60	28.0	28.0	8.06	31,1	47.4
65	28.0	28.0	8.03	20,8	49.6
70	28.0	28.0	8.24	20,3	51.7



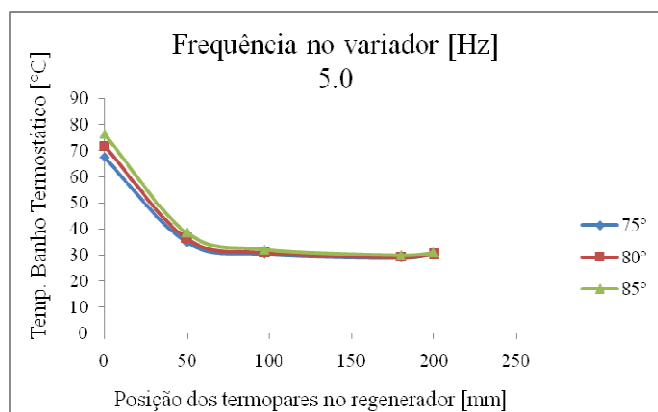
(a)



(b)

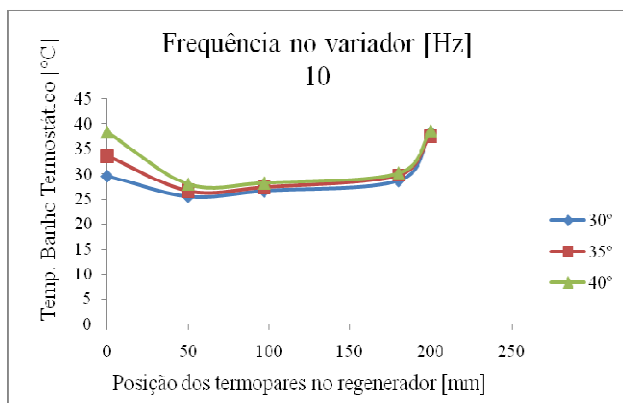


(c)

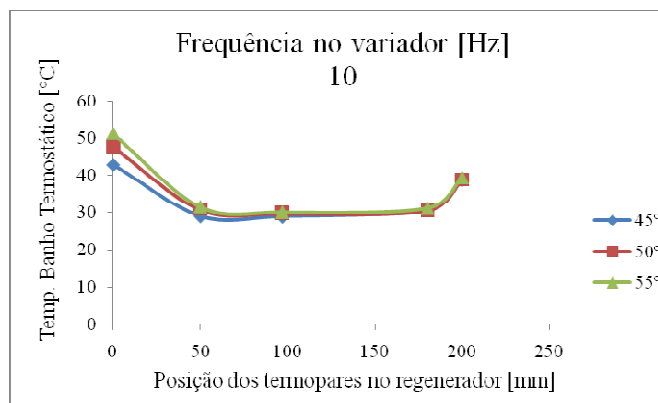


(d)

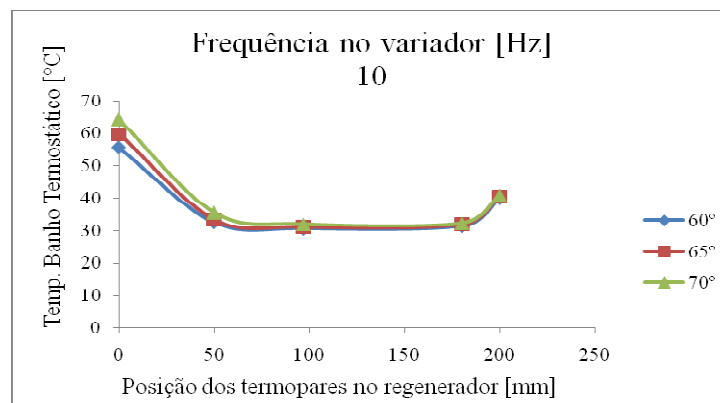
Fig.31. Curvas dos ensaios com ao regenerador com material 3 e $f=5\text{Hz}$



(a)



(b)



(c)

Fig.32. Curvas dos ensaios com ao regenerador com material 3 e $f=10\text{Hz}$

Os gráficos da figura 31 indicam que a temperatura ao longo do regenerador estabiliza muito rapidamente, embora a temperatura máxima a que o regenerador atinge é de $32,1^{\circ}\text{C}$, correspondente aos 85° . Assim, seria preciso muito mais tempo, do que aquele que foi dado, para qualquer um dos casos, mas principalmente para os que correspondem as mais altas temperaturas no banho termostático, para que o regenerador se aproxime da temperatura do 'banho'.

A figura 32 mostra para os três gráficos traçados, que a temperatura estabiliza até a uma zona intermédia do regenerador e tende a subir perto da zona do trocador da zona fria, o que sugere uma possível má colocação dos termopares intermédios e consequentemente uma leitura não do fluido, mas do material que compõe o miolo do regenerador.

Tabela 9 Valores das Temperaturas média efectivas

5Hz			
Temp.no Banho [°C]	Material 1 $T_{med.regenerador}[^{\circ}\text{C}]$	Material 2 $T_{med.regenerador}[^{\circ}\text{C}]$	Material 3 $T_{med.regenerador}[^{\circ}\text{C}]$
30	26.7	27.6	28.9
35	28.7	29.5	28.6
40	30.8	31.6	33.4
45	32.4	34.0	35.2
50	34.6	36.2	37.4
55	36.5	38.2	39.3
60	38.5	39.9	40.7
65	40.7	41.1	43.0
70	41.4	43.4	44.9
75	43.2	44.9	46.4
80	44.8	-----	48.1
85	47.4	-----	50.2

Tabela 10 Valores das Temperaturas média efectivas

10Hz			
Temp.no Banho [°C]	Material 1	Material 2	Material 3
	$T_{med.regenerador}[°C]$	$T_{med.regenerador}[°C]$	$T_{med.regenerador}[°C]$
30	27.2	-----	33.8
35	29.4	30.4	35.6
40	31.6	32.5	38.5
45	33.7	34.6	40.8
50	35.6	36.3	43.1
55	37.6	38.3	45.1
60	38.0	40.3	47.4
65	39.3	42.4	49.6
70	41.7	44.4	51.7
75	44.0	45.8	-----
80	45.6	47.5	-----
85	46.4	49.0	-----

Tabela 11 Valores das Temperaturas média efectivas

15Hz		
Temp.no Banho [°C]	Material 1	Material 2
	$T_{med.regenerador}[°C]$	$T_{med.regenerador}[°C]$
30	27.3	-----
35	29.2	32.2
40	30.4	33.9
45	32.7	36.3
50	34.9	41.1
55	36.4	-----
60	37.8	47.5
65	40.1	50.0
70	42.1	52.4
75	43.0	54.6
80	45.5	56.3
85	47.4	-----

Os quadros 9, 10 e 11, apresentam valores das temperaturas média efectivas dos três materiais ao longo do regenerador. Os gráficos estão em perfeita sintonia no sentido em que nos três, vê-se que esse parâmetro apresenta os valores maiores para o terceiro material, e para o segundo apresenta valores intermédios, se comparados com a média dos demais.

8. CONCLUSÃO

- Para o estudo do regenerador com material 1, é possível ver que quando se aumenta a temperatura para valores superiores a 55°C, independentemente da frequência a que se esteja a trabalhar, torna-se necessário deixar o pistão a trabalhar mais algum tempo para que o regenerador absorva mais por forma a estabilizar a sua temperatura.
- O facto de a temperatura se manter quase inalterada, poderá advir de a diferença de temperatura ser demasiado baixa, pelo que a parte do regenerador do lado quente recebe o calor e rejeita-o, e na parte mais perto do lado frio, a diferença de temperaturas já é demasiado baixa para que a transferência se efectue em regime pulsante.
- Os gráficos com a lã de aço (material 2) apresentam-se mais regulares e espelham melhor aquilo o que se pretende de um regenerador, ou seja, recolher no seu miolo o máximo de calor proveniente de ambas as zonas, mantendo os dois lados a diferenças de temperaturas próximas das que estão nos seus trocadores (que neste caso foi usada a água em ambos os lados).
- É com o terceiro material que o regenerador tem o pior desempenho, ou seja, é definitivamente um material a não usar em projecto de regeneradores devido ao seu alto grau de condutividade térmica, tal propriedade evidenciada pelo facto de que próximo da zona fria estar quase a temperatura de entrada no regenerador (T3).

Em jeito de remate, dizer que os resultados da experiência apresentados nos gráficos, mas também nas tabelas (na coluna correspondente ao $\dot{Q}_{transferido}$), evidenciam mais uma vez que o melhor material em uso neste projecto foi a lã de aço, uma vez que foi com esse material que se registou em termos gerais a a menor taxa de transferência de energia para a água da zona fria. Esta baixa taxa deve-se principalmente a uma condutividade baixa do material.

9. Sugestões para trabalhos futuros

Este é um projecto num campo que desperta bastante interesse, uma vez que nos dias de hoje o termo recuperação de energia tem vindo a fazer cada vez mais sentido. Os objectivos primários para este trabalho foram amplamente alcançados, mas novas perspectivas surgiram e merecem ser melhor exploradas em trabalhos futuros tais como: a variação da pressão para valores acima da atmosférica, estudo dos melhores materiais para uma blindagem mais rigorosa ao sistema (regenerador e zona quente e fria) para diminuir o efeito dos processos de transferência de calor para o exterior.

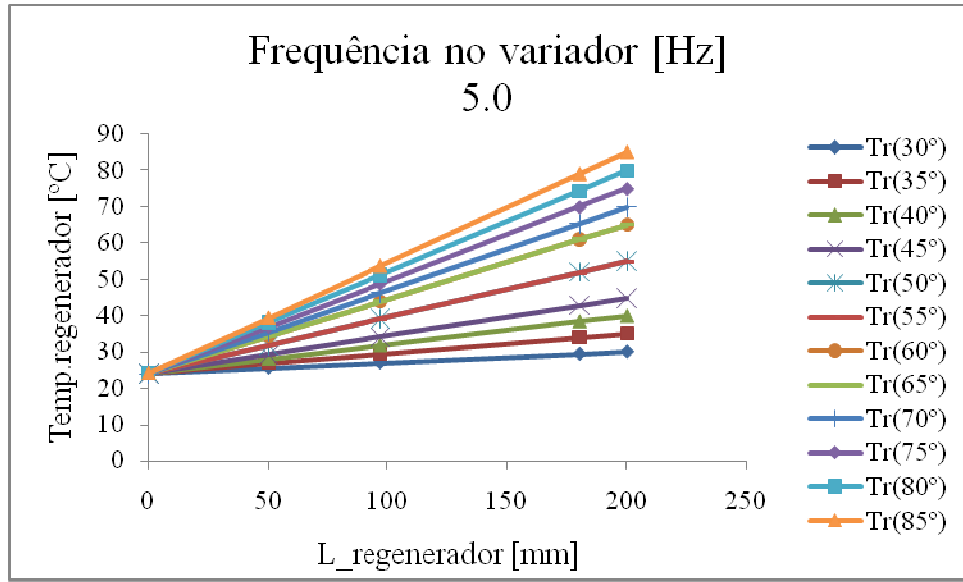
10. BIBLIOGRAFIA

- [1] HUMBERTO WILKE; Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída – NEST
- [2] Jonas Cordeiro da Silva Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia. Av. Roraima, Cidade Universitária, prédio7. Santa Maria, RS. CEP 97105-900
- [3] Ing. Jan MACHÁČEK, Doctoral Degree Programme (1) Dept. of Electrical Power Engineering, FEEC, BUT E-mail: xmacha08@stud.feec.vutbr.cz
- [4] “The Stirling Engine” Gunther Cronenberg March 28, 2005 written in addition to the Stirling Lab at Uppsala University in February 2005
- [5] ROBLEDO WAKIN BARROS Universidade Federal de Itajubá / Núcleo de Estudos em Sistemas Térmicos – NEST (IEM/UNIFEI) Av BPS 1303, CP 50, Itajubá, MG, CEP 37.500-903 – Brasil. Tel. (35) 3629-1355
Email: robledo@unifei.edu.br
- [6] “Stirling Engine” Prof. S. L. Bapat, Mechanical Engineering Department of Energy Science and Engineering Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai – 400 076 April 28, 2008.
- [7] Motor de Stirling “Estudo de um motor térmico” Relatório de Física Experimental III 2004/2005 Engenharia Física Tecnológica
- [8] “The Application of The Solar-Air Stirling Generator for The Martian Surface Mission” Yung-Kang Sun1 *University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, 76013*
- [9] “Heat Exchanger Design Book”, T. Kuppan, Marcel Dekker, Inc.270 Madison Avenue, New York 2000

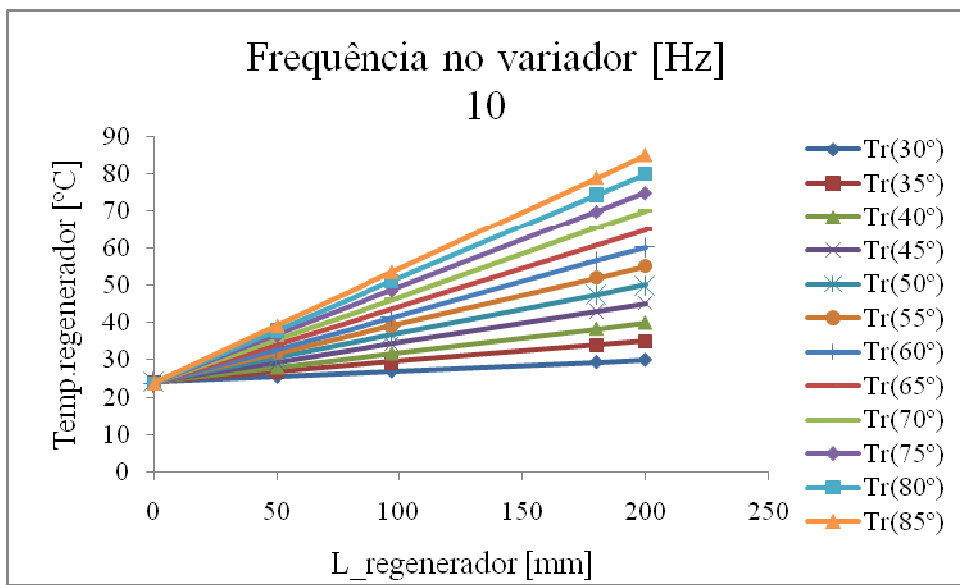
- [10] “Projecto de Transferência de Calor em Regeneradores Industriais Cowpers”, João Paulo Braz de Campos brazdecampos@yahoo.com.br Universidade Federal Fluminense, EEIMVR
- [11] “Future NASA Multi-kilowatt Free Piston Stirling Applications” Henry W. Brandhorst, Jr. Space Research Institute, Auburn University, Auburn University, AL 36849-5320
- [12] “An Initial Non-Equilibrium Porous-Media Model for CFD Simulation of Stirling Regenerators” Roy Tew*NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH, 44135 Terry Simon† University of Minnesota, Minneapolis, MN, 55455 David Gedeon‡ Gedeon Associates, Athens, OH, 45701Mounir Ibrahim§ and Wei Rong**Cleveland State University, Cleveland, OH, 44115
- [13] “Development of Advanced Stirling Radioisotope Generator for Space Exploration” Jack Chan Lockheed Martin Space Systems Company, King of Prussia, Pennsylvania J. Gary Wood Sunpower Inc., Athens, Ohio Jeffrey G. Schreiber Glenn Research Center, Cleveland, Ohio.
- [14] “Heat and Thermodynamics” Mark W. Zemansky, PH. D, copyright 1973, 1968 by Mc Graw-Hill, Inc.

Anexos

Lr	Tr(30°)	Tr(35°)	Tr(40°)	Tr(45°)	Tr(50°)	Tr(55°)	Tr(60°)	Tr(65°)	Tr(70°)	Tr(75°)	Tr(80°)	Tr(85°)
200	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1
	25,6	26,8	28,1	29,3	30,6	31,8	33,1	34,3	35,6	36,8	38,1	39,3
	27,0	29,4	31,8	34,2	36,7	39,1	41,5	43,9	46,4	48,8	51,2	53,6
	29,4	33,9	38,4	42,9	47,4	51,9	56,4	61,0	65,5	70,0	74,5	79,0
	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0
declive	0,0295	0,0545	0,0795	0,1045	0,1295	0,1545	0,1795	0,2045	0,2295	0,2545	0,2795	0,3045



Lr	Tr(30°)	Tr(35°)	Tr(40°)	Tr(45°)	Tr(50°)	Tr(55°)	Tr(60°)	Tr(65°)	Tr(70°)	Tr(75°)	Tr(80°)	Tr(85°)
200	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8
	25,6	26,8	28,1	29,3	30,6	31,8	32,9	34,1	35,4	36,6	37,9	39,1
	27,0	29,4	31,8	34,2	36,7	39,1	41,4	43,8	46,2	48,6	51,1	53,5
	29,4	33,9	38,4	42,9	47,4	51,9	56,4	60,9	65,4	69,9	74,4	78,9
	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0



Lr	Tr(30°)	Tr(35°)	Tr(40°)	Tr(45°)	Tr(50°)	Tr(55°)	Tr(60°)	Tr(65°)	Tr(70°)	Tr(75°)	Tr(80°)	Tr(85°)
200	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
	25,7	27,0	28,2	29,5	30,7	32,0	33,0	34,3	35,5	36,8	38,0	39,3
	27,1	29,5	31,9	34,3	36,8	39,2	41,5	43,9	46,3	48,7	51,2	53,6
	29,4	33,9	38,4	43,0	47,5	52,0	56,4	60,9	65,4	70,0	74,5	79,0
	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0

