

ANÁLISE TÉRMICA DE UMA CENTRÍFUGA A GÁS PARA SEPARAÇÃO DE ISÓTOPOS

Delvonei Alves de Andrade* e José Luís Ferraz Bastos*

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN
Travessa R, 400
05508-900, São Paulo, Brasil

RESUMO

A capacidade de separação de uma centrífuga é resultado da composição do campo centrífugo e do escoamento secundário na direção axial junto à parede do rotor. Devido a restrições mecânicas do material utilizado, o campo centrífugo não pode ser aumentado. Por outro lado para uma dada configuração geométrica do equipamento, pode-se atuar sobre o escoamento secundário através dos campos de temperatura nas tampas e no perfil axial do rotor.

Este trabalho apresenta o modelo térmico de uma centrífuga que possibilita um entendimento dos principais mecanismos de transferência de calor. Esta análise considera a condução nas partes estruturais do rotor e carcaça, radiação com múltipla reflexão entre o rotor e carcaça, e convecção para o ambiente. O modelo é baseado no método nodal.

I. INTRODUÇÃO

A capacidade de separação de uma centrífuga é resultado da superposição do campo centrífugo ao escoamento secundário (contra corrente) na direção axial junto à parede do rotor. A física do escoamento é descrita em vários trabalhos [1,2,3,4]. O campo centrífugo é gerado pelo movimento de rotação do rotor e devido a restrições mecânicas do material utilizado, não pode ser alterado. Por outro lado, existem quatro maneiras fundamentais de gerar ou intensificar o escoamento secundário no rotor [5]: (a) Controlar a diferença de temperatura entre as tampas do rotor (End Cap Thermal Drive); (b) Controlar o perfil axial de temperaturas do rotor (Wall Thermal Drive); (c) Otimizar o sistema de retirada (Scoop Type Drive); (d) Dimensionar o sistema de alimentação (Feed Drive).

A diferença de temperatura entre as tampas (a) e o perfil axial de temperaturas (b) são responsáveis pela contra corrente convectiva do gás junto à parede do rotor. Já a presença física dos coletores em conjunto com o disco girante geram uma contra corrente mecânica. O escoamento secundário é resultado da somatória das correntes convectiva e mecânica, Fig. 1 (Extraído de [5]). O sistema de alimentação é posicionado de maneira a não se contrapor à contra corrente mecânica acima mencionada.

Observa-se que, para uma dada configuração geométrica do equipamento, pode-se atuar somente sobre os campos de temperatura, nas tampas e no perfil axial do rotor, para se alterar o escoamento secundário melhorando a eficiência da centrífuga. Desta maneira, é proposto neste

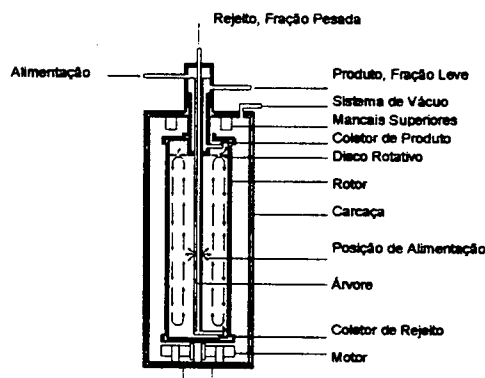


Figura 1. Esquema de uma Centrífuga a Gás

projeto o estudo detalhado dos fenômenos de transferência de calor na centrífuga para um melhor entendimento do campo de temperaturas e distribuição dos fluxos de calor.

Tendo em vista as dificuldades de instrumentação e os altos custos envolvidos, optou-se por uma abordagem numérica para o problema. Propõe-se portanto, o desenvolvimento de um modelo térmico, baseado no Método Nodal, para a representação dos fenômenos de transferência de calor nas partes estruturais do equipamento. Este modelo será, numa próxima fase,

acoplado a um modelo hidrodinâmico (Maliska, C.R.; Silva, A.F.; Andrade, D.A. [6]) baseado no método dos Volumes Finitos, para o escoamento fluido no interior do rotor.

II. MODELO TÉRMICO

Introdução - O modelo numérico é baseado no Método Nodal que consiste em subdividir um sistema em um número finito de volumes supostos isotérmicos. Estes volumes são denominados "nós", e são interligados por "Conduâncias Térmicas", cujas expressões variam segundo o tipo de transferência de calor envolvida. A cada nó estão associados uma capacitância térmica e eventualmente um fluxo de calor. O quadro abaixo, Tabela 1, mostra as expressões dos diferentes tipos de conduâncias para geometria cilíndrica.

TABELA 1. Expressões das Diferentes Conduâncias

Troca	Expressão	Denominação
Condução	$G_{ij}^l = 2\pi\lambda L / \ln(R_e / R_i)$	Linear
Convecção	$G_{ij}^l = hS$	Linear
Radiação	$G_{ik}^r = S\varepsilon_i g_{ik} \sigma (T_i^2 + T_k^2)(T_i + T_k)$	Radiativa

onde:

- λ condutividade térmica;
- L altura do volume;
- R_e raio do centro de um volume de controle externo;
- R_i raio do centro de um volume de controle interno;
- S área de troca;
- h coeficiente de película;
- g_{ik} é o fator de forma com multi reflexão;
- ε_i emissividade do nó i ;
- σ constante de Stefan-Boltzmann;
- T_i, T_k temperaturas.

A expressão da equação de balanço de energia, para um nó do sistema considerado é da forma:

$$C_i \dot{T}_i = \sum_{j=1}^n G_{ij}^l (T_j - T_i) + \sum_{k=1}^m G_{ik}^r (T_k - T_i) + Q_i$$

onde:

- \dot{T}_i representa a derivada temporal da temperatura;
- C_i é a capacitância térmica do nó i ;
- G_{ij}^l representa as conduâncias lineares que podem ser de condução, convecção;
- G_{ik}^r é a conduância radiativa;
- Q_i fluxo de calor.

Assim, simular o comportamento térmico de um sistema, através do método nodal, significa resolver um sistema de equações álgebra-diferenciais acoplado.

A elaboração e análise de resultados de um modelo térmico passa pelas fases de pré-processamento, para uma verificação da geometria descrita e cálculo das conduâncias; processamento ou resolução do sistema de equações; e uma fase de pós-processamento para visualização dos resultados obtidos.

Para realização destas etapas, foi utilizado o código PCTER [7] que é formado por alguns programas compatíveis entre si, e que realizam as seguintes funções:

GEOTRI - pré-processador geométrico tridimensional e cálculo das conduâncias condutivas e convectivas.

GEO - cálculo dos fatores de forma radiativos.

RAD - cálculo das conduâncias radiativas levando em conta os efeitos de multi-reflexão.

ANATER - resolução do sistema de equações álgebra-diferenciais

A elaboração do modelo térmico considerou os seguintes fenômenos de transferência de calor: condução de calor entre as diversas partes estruturais; radiação nas regiões de vácuo; convecção natural para o meio ambiente.

Descrição do modelo - A geometria utilizada para o definir o problema térmico é apresentada na Fig. 2. A Tabela 2 descreve os diferentes blocos que compõe o modelo. Um bloco é uma entidade geométrica que será posteriormente dividida em nós. Um bloco pode representar um elemento simples da centrífuga. Um exemplo é o bloco número 700 que representa a bomba molecular. Pode também representar um elemento complexo como o bloco número 400, motor, que é composto por materiais diferentes. Neste caso, para a correta representação do fenômeno de transferência de calor, as condutividades térmicas equivalentes para cada direção considerando todos os diferentes tipos de materiais foram calculadas e as propriedades retiradas de [8], [9].

O cálculo das trocas radiativas necessita do conhecimento dos fatores de forma para as superfícies. Estes fatores são calculados para geometrias planas. Desta forma, para o cálculo destes fatores de forma foi necessário facetar a geometria cilíndrica da centrífuga obtendo um polígono regular como mostrado na Fig. 3. Esta figura mostra uma seção transversal do cilindro e carcaça e as trocas radiativas diretas entre as superfícies. Os efeitos de multi reflexão conectando todos os nós não são representados para não sobrecarregar a figura.

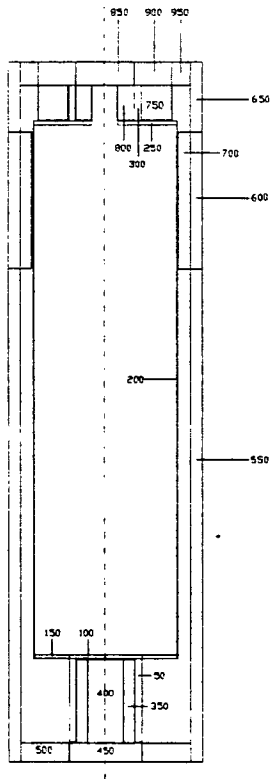


Figura 2. Geometria do Modelo

TABELA 2. Descrição dos Blocos/Elementos

Bloco	Elemento
50	Rotor inferior do motor
100	Parte da tampa inferior do cilindro interno
150	Parte da tampa inferior do cilindro interno
200	Cilindro Interno
250	Parte da tampa superior do cilindro interno
300	Parte da tampa superior do cilindro interno
350	Enrolamento do motor
400	Núcleo do motor
450	Parte da tampa inferior da carcaça
500	Parte da tampa inferior da carcaça
550	Parte da carcaça
600	Parte da carcaça
650	Parte da carcaça
700	Bomba molecular
750	Mancal axial
800	Parte do mancal superior
850	Parte da tampa superior da carcaça
900	Parte da tampa superior da carcaça
950	Parte da tampa superior da carcaça

Depois do cálculo das condutâncias radiativas, considerando a simetria azimutal do problema, as oito superfícies que compõe uma região específica da centrífuga são fundidas num único nó. Como consequência, existem várias condutâncias radiativas conectando o nó que representa uma dada seção transversal do cilindro e o nó da carcaça correspondente.

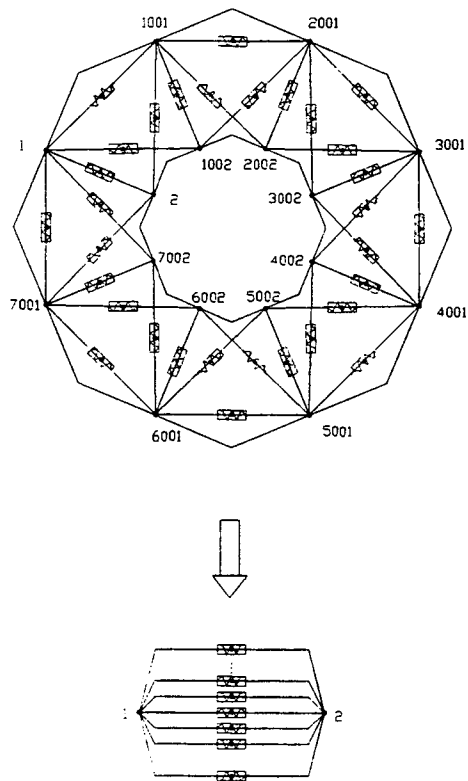


Figura 3. Representação de uma Seção Transversal do Cilindro e Carcaça

A Fig. 4 mostra a divisão nodal para diferentes elementos da centrífuga. Na Fig. 4(a), o motor (blocos 350 e 400) e a tampa inferior da carcaça (blocos 450 e 500) são representados. A Fig. 4(b) mostra uma montagem do motor, tampa inferior da carcaça, rotor do motor (bloco 50) e a tampa inferior do cilindro (blocos 100 e 150).

A Fig. 4(c) representa os mesmos blocos da Fig. 4(b) adicionado do cilindro e da tampa superior do cilindro. Notar que a parede lateral do cilindro foi dividida em vários nós a fim de termos uma maior precisão na indicação do gradiente de temperaturas. A Fig. 4(d) é a Fig. 4(c) mais a tampa superior da carcaça. Finalmente, o modelo completo é mostrado na Fig. 4(e). Uma representação em linhas para a carcaça, bomba molecular e mancal axial é mostrada.

As principais fontes de calor neste modelo de centrífuga são: motor, bomba molecular, mancal axial e o gás em escoamento em contato com o scoop.

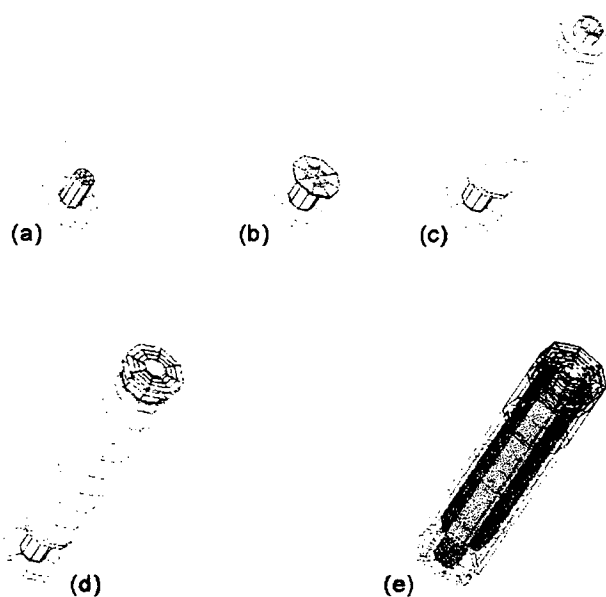


Figura 4(a,b,c,d,e). Divisão Nodal dos Elementos da Centrífuga

Os valores na Tabela 3 são baseados em estudos teóricos. Note que o fluxo gerado pelo coletor de rejeito é 4 W e pelo coletor de produto 2 W. Estes fluxos de calor são devido aos efeitos viscosos do gás em escoamento sobre os coletores ou scoops. O fluxo de calor gerado pelo coletor de rejeito é maior devido sua posição numa região de pressão mais alta no escoamento.

TABELA 3. Fluxos de Calor

Bloco/Nó	Fluxos (Watts)
200/202	4
200/211	2
350/350	15
400/400	5
700/700	5
750/750	5

Convecção natural é considerada entre a carcaça e o meio ambiente. O cálculo do coeficiente de película foi feito considerando correlações clássicas da literatura.

III RESULTADOS

A Fig. 5(a) mostra a distribuição de temperaturas para o cilindro considerando as propriedades térmicas e óticas da Tabela 4. As Fig. 5(b,c) mostram as temperaturas da carcaça. A região central da tampa inferior da carcaça apresenta a maior temperatura devido sua posição próxima

ao motor. A parede lateral da carcaça apresenta temperaturas próximas à temperatura ambiente. A máxima temperatura para o cilindro ocorre na região do coletor de rejeito e motor que está sujeita aos maiores fluxos. A máxima temperatura para esta região é $T = 59.30^{\circ}\text{C}$. A temperatura da tampa inferior do cilindro é maior que a superior, $\Delta T = 24.50^{\circ}\text{C}$; neste caso a contra corrente convectiva é bastante favorecida. As escalas de temperaturas apresentam valores médios entre as regiões vizinhas.

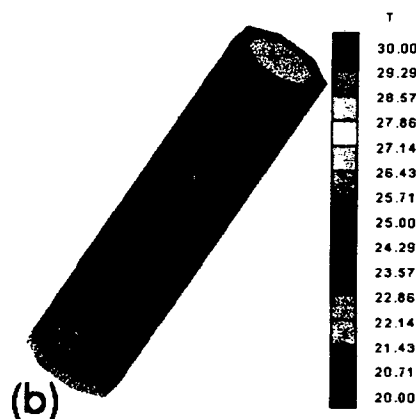
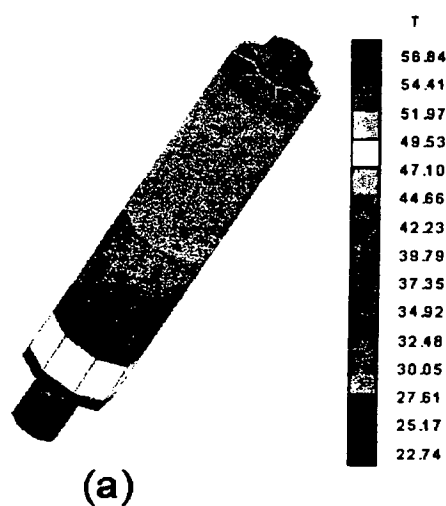


Figura 5(a,b,c). Distribuição de Temperaturas para o Rotor, Carcaça e Detalhe da Carcaça

TABELA 4. Propriedades Térmicas e Óticas

Bloco	$K_{\text{equivalente}}(\text{W/mK})$		$\varepsilon = \alpha$
	k_r	k_c	
50	76.11	26.42	0.13
100	20.10	20.10	-
150	20.10	20.10	0.13
200	20.10	20.10	0.60
250	20.10	20.10	-
300	68.72	26.70	-
350	9.34	35.78	-
400	15.00	15.00	-
450	45.00	45.00	-
500	45.00	45.00	0.08
550	45.00	45.00	0.08
600	45.00	45.00	-
650	45.00	45.00	0.08
700	234.0	234.0	0.50
750	10.82	43.89	0.20
800	10.13	5.58	-
850	45.00	45.00	-
900	45.00	45.00	-
950	45.00	45.00	0.08

III.1. Análise de sensibilidade à posição dos coletores

A Fig. 6 mostra o comportamento térmico da centrífuga mudando-se os coletores de posição. O coletor de rejeito é agora posicionado na parte superior e o de produto é localizado na parte inferior do rotor. A máxima temperatura para o rotor é menor para este caso e ocorre numa região diferente. Devido ao bom acoplamento radiativo entre a bomba turbo molecular e a carcaça, o fluxo gerado pelo coletor de rejeito é retirado mais facilmente. As temperaturas das tampas do cilindro são bastante próximas, $\Delta T = 1.73^\circ\text{C}$. A distribuição axial de temperaturas é praticamente simétrica. Neste caso a componente térmica da contra corrente tem pequena influência.

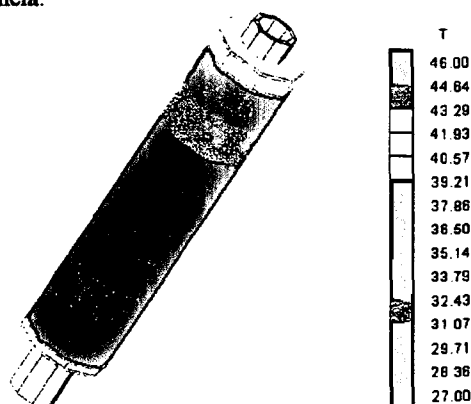


Figura 6. Distribuição de Temperaturas - Sensibilidade à Posição dos Coletores

III.2. Análise de sensibilidade às propriedades óticas dos materiais

A maior parte dos fluxos gerados pelo motor e coletores é retirada por radiação entre o cilindro e a carcaça. Portanto, alterar as propriedades óticas pode ser uma maneira eficiente de melhorar o acoplamento entre rotor e carcaça diminuindo as temperaturas da centrífuga. As emissividades consideradas podem ser alteradas, na prática, com diferentes tratamentos térmicos. As emissividades dos blocos 50,150 correspondem ao aço tratado superficialmente com zinco e cromo. Os blocos 200, 500 550, 650 e 950 correspondem ao aço oxidado e o bloco 700 ao alumínio anodizado, Tabela 5. A Fig. 7 mostra a distribuição de temperaturas para o rotor para a mesma posição dos coletores de rejeito e produto da primeira configuração estudada. Fig. 5. Nota-se uma diminuição sensível no nível das temperaturas. Aqui a temperatura máxima é da ordem de 42°C . A diferença de temperaturas entre as tampas do cilindro também foi reduzida, $\Delta T = 6.97^\circ\text{C}$ contra $\Delta T = 24.5^\circ\text{C}$ na Fig. 5.

TABELA 5. Emissividade dos Materiais

Bloco	Emissividades
50	0.30
150	0.30
200	0.50
500	0.50
550	0.50
650	0.50
700	0.50
750	0.20
950	0.50

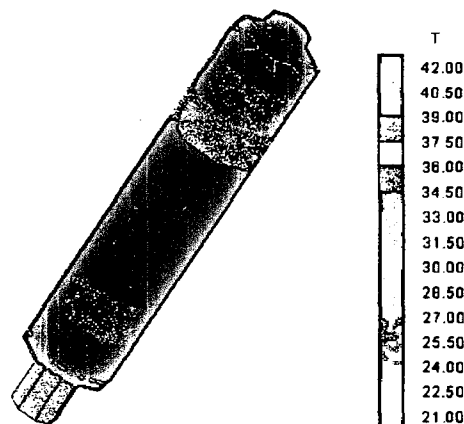


Figura 7. Distribuição de Temperaturas - Sensibilidade às Propriedades Óticas dos Materiais

IV. CONCLUSÕES

O comportamento térmico de uma centrífuga a contra corrente foi analisado pelo Método Nodal considerando os principais mecanismos de transferência de calor envolvidos. Os fluxos de calor gerados no motor e coletores são evacuados principalmente por radiação entre o cilindro e a parede.

Análises de sensibilidade foram apresentadas mostrando que a distribuição de temperaturas para a centrífuga é fortemente modificada invertendo-se a posição dos coletores. Posicionando o coletor de rejeito na região superior do cilindro a máxima temperatura é $13.90^{\circ}C$ menor que a configuração onde o coletor está na posição inferior.

As propriedades térmicas dos materiais mostraram-se muito importantes. Sendo a troca por radiação o principal mecanismo para retirar calor, um melhor acoplamento entre o cilindro e a carcaça reduz significativamente a temperatura média da centrífuga.

REFERÊNCIAS

- [1] Greenspan, H. P., **Theory of Rotating Fluids**, Cambridge University Press, London (1969).
- [2] Sakurai, T. and Matsuda, T., **Gasdynamics of a Centrifugal Machine**, Journal of Fluid Mechanics. Vol. 62(4), 727-737 (1974).
- [3] Stewartson, K., **On Almost Rigid Rotation**, Journal of Fluid Mechanics. Vol. 3, 17-26 (1957).
- [4] Bark, F. and Bark, T. H., **On vertical boundary Layers in a Rapidly Rotating Gas**, Journal of Fluid Mechanics. Vol. 78(4), 749-762 (1976).
- [5] Soubbaramayer - **Centrifugation** - In: Villani, S.; ed. Uranium Enrichment, Springer Verlag, Berlin, 1979.
- [6] Maliska, C.R.; Silva, A.F.; Andrade, D.A. - **A Strong Coupling Procedure for the Segregated Solution of Rotating Flows** - Proceedings of the Third Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases - August - 1992 - pag 223-232.
- [7] Bastos, J.L.F.; Muraoka, I. ; Cardoso, H. P. - **Pacote de Análise Térmica - PCTER** - Anais do 1o Simpósio Brasileiro de Tecnologia Aeroespacial - august - 1990 - São José dos Campos - SP - Brazil.
- [8] Siegel, R. ; Howell, J.R., **Thermal Radiation Heat Transfer**, McGraw-Hill, 1972.
- [9] Özisik, M.N., **Heat Transfer - A Basic Approach**, McGraw-Hill, 1985.

ABSTRACT

The separation efficiency of a centrifuge is strongly influenced by the temperature distribution. For a given machine, the centrifuge field can not be altered and the effort to augment the separation efficiency should be concentrated on the thermal component of the secondary flow.

This paper presents a thermal model of a centrifuge in order to understand the main heat transfer mechanisms and to establish the boundary conditions for a fluid flow computer code. The heat transfer analysis takes into account conduction at the structure parts of the rotor and shell, radiation with multi-reflections between the rotor and the shell, and convection to the ambient. The model is based on the nodal method which consists in dividing a system into a finite number of isothermal volumes. These volumes are called "nodes" and are connected by thermal conductances, which vary according to the kind of heat transfer involving these elements. For each node it is associated a thermal capacitance and eventually a heat flux.

This paper consolidates the first part of a bigger work involving the structure heat transfer and the flow inside the rotor, since the correct establishment of the thermal boundary conditions influences decisively the velocities, temperature, density and pressure fields.