

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR GASTÃO
DIAS MOTTA E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 07/08/91.

ORIENTADOR

CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO
DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA
DE SANGUE

16/91

Trabalho apresentado à Comissão de
Pós-Graduação da Faculdade de
Engenharia Mecânica como parte dos
requisitos para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Mecânica.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE MESTRADO :

CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO DE
UMA BOMBA CENTRÍFUGA DE SANGUE

AUTOR: Gastão Dias Motta

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Celso F. de Arruda *medica*

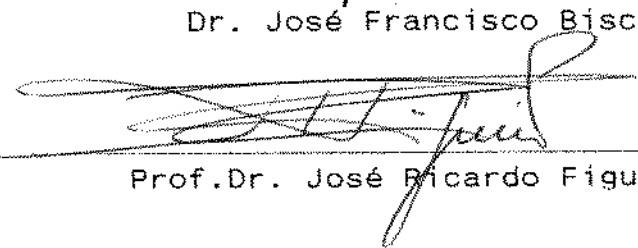
Aprovado por:



Prof. Dr. Antonio Celso F. de Arruda
Presidente



Dr. José Francisco Biscegli



Prof. Dr. José Ricardo Figueiredo

Campinas, julho de 1991

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. José Francisco Biscegli, diretor do Centro Técnico de Pesquisas e Experimentos (CTPE) do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia (IDPC - São Paulo - SP), pela valiosa colaboração prestada na escolha do tema central deste projeto.

À equipe do CTPE do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia, e em particular ao Eng^o. Aron José Pazin de Andrade, pela sua contribuição durante todo o desenvolvimento da parte experimental deste trabalho.

Aos Profs. José Ricardo Figueiredo, Fernando de Almeida França e Eugênio Spano Rosa, do Dep^o de Engenharia Mecânica da UNICAMP, pelas apreciações realizadas sobre o trabalho desenvolvido.

Ao Dr. Luiz Carlos Bento de Souza, médico do IDPC, pela discussão sobre assuntos de ordem médica relevantes a este trabalho.

Ao Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda, orientador deste trabalho, pela competência demonstrada na transmissão de sua experiência como distinto pesquisador acadêmico.

Este trabalho foi desenvolvido com o auxílio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sob a forma de uma bolsa de mestrado / processo no. 131910/86-8.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo básico contribuir para o desenvolvimento de uma bomba centrífuga de sangue funcionando sob o princípio do arrasto viscoso entre uma ou mais superfícies lisas rotativas e o sangue. A sua elaboração pode ser dividida numa parte experimental e numa parte teórica, as quais foram desenvolvidas de maneira simultânea mas absolutamente independentes entre si.

Foi realizada uma extensa revisão bibliográfica a respeito de uma série de tópicos relacionados às bombas artificiais de sangue, incluindo aspectos aplicativos, históricos, construtivos e outros. A parte experimental do trabalho consistiu nas construções de um protótipo da bomba centrífuga de sangue e de uma bancada de teste para a experimentação deste. A parte teórica consistiu na dedução completa de um modelo matemático para a previsão aproximada do escoamento do fluido através da bomba centrífuga, e na elaboração de um programa para a utilização deste modelo em simulações numéricas realizadas em microcomputador.

Os resultados experimentais e teóricos obtidos são apresentados, analisados e comparados entre si. São discutidas a validade do modelo matemático e a sua utilização num futuro trabalho de otimização do projeto da bomba. São ainda apresentadas algumas sugestões para uma futura continuidade deste trabalho.

ABSTRACT

The basic aim of this research is to contribute to the development of a centrifugal blood pump based on the viscous shear-force between one or more rotating smooth surfaces and the blood. This investigation has both an experimental part and a theoretical analysis, which have been simultaneously developed as absolutely independent works.

It has been done an extensive bibliographic review of a few topics concerning artificial blood pumps, including clinical, historical and constructive aspects, among others. The experimental part of the research consisted in the construction of a centrifugal blood pump prototype and also a test apparatus used to perform experimentations. The theoretical analysis included a complete formulation of a mathematical model capable of predicting the fluid flow through the centrifugal pump, and the development of a software to be runned on a microcomputer in order to perform numerical simulations.

The experimental and analytical results are shown, evaluated and compared. The validity and future applications of the mathematical model are discussed. Some guide lines for a future continuation of this research are also provided.

SUMÁRIO

I	INTRODUÇÃO	4
II	AS BOMBAS ARTIFICIAIS DE SANGUE	2
	2.1 Aplicações das bombas de sangue	2
	2.2 Histórico sobre o desenvolvimento das bombas de sangue	4
	2.3 Problemas encontrados no bombeamento artificial do sangue	9
	2.4 Fluxo pulsátil ou não-pulsátil?	11
	2.5 Alguns modelos de bombas de sangue	12
	2.6 Requisitos para uma bomba centrífuga de sangue	24
	2.7 Perspectivas para o futuro	26
III	PARTE EXPERIMENTAL	28
	3.1 Introdução	28
	3.2 Projeto e construção do protótipo	29
	3.3 Experimentação do protótipo	30
IV	MODELAMENTO MATEMÁTICO	37
	4.1 Introdução	37
	4.2 Considerações preliminares	37
	4.3 Apresentação do problema	41
	4.4 Descrição do modelo matemático	44
V	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
	5.1 Introdução	64
	5.2 Resultados experimentais	64
	5.3 Resultados teóricos	66
	5.4 Discussão	76
VI	CONCLUSÕES	80
VII	SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO	82
	ANEXO A - O sistema cardiovascular	84
	ANEXO B - Acionamento e controle de velocidade do rotor	88
	ANEXO C - Desenhos do protótipo	90
	ANEXO D - Fotografias	95
	ANEXO E - Algumas deduções matemáticas	98
	ANEXO F - Programa de computador	103
	ANEXO G - Listagens dos resultados obtidos em computador	115
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149

I - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e o aperfeiçoamento de órgãos artificiais e próteses em geral tem merecido a atenção de diversos grupos de pesquisadores nas últimas décadas, com o objetivo de criarem-se condições para a melhoria da qualidade de vida e o prolongamento desta em indivíduos portadores de diversos tipos de disfunções orgânicas. A busca de substitutos temporários e permanentes para o coração, ou simplesmente de aparelhos para assistência à atividade cardíaca, ganha especial destaque dentro do campo da Engenharia Biomédica, visto que as doenças cardiovasculares se constituem numa das principais causas de mortalidade no mundo moderno.

Esta situação tem resultado em grandes esforços dispendidos no sentido do desenvolvimento de bombas artificiais de sangue cada vez mais seguras. Dentro deste contexto, a equipe do Centro Técnico de Pesquisas e Experimentos (CTPE) do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia (IDPC - São Paulo/SP) analisou os bons resultados conseguidos nos últimos anos com a aplicação de alguns modelos de bombas centrífugas de sangue, decidindo então pela realização de estudos para se analisar a viabilidade do desenvolvimento de um aparelho deste tipo em suas dependências.

O objetivo principal que permeou a realização deste trabalho teórico-experimental foi portanto o desenvolvimento das etapas iniciais de um projeto visando à construção de uma bomba centrífuga de sangue atendendo a uma série de exigências que serão oportunamente explicitadas neste texto.

Apenas como subsídio para uma melhor compreensão deste texto, o Anexo A apresenta de forma resumida alguns principais aspectos anatômicos e fisiológicos ligados ao sistema cardiovascular.

II - AS BOMBAS ARTIFICIAIS DE SANGUE

2.1 APLICAÇÕES DAS BOMBAS DE SANGUE

Diversos tipos de próteses e equipamentos mecânicos e elétricos em geral têm sido desenvolvidos com a finalidade de suprir uma série de deficiências passíveis de serem encontradas no funcionamento do coração. Devido ao grande número de casos em que têm sido utilizados, destacamos aqui as válvulas artificiais, os marcapassos e as bombas artificiais de sangue. Estas últimas são de particular interesse para o nosso trabalho, sendo pois focalizadas a seguir com atenção especial.

A circulação extracorpórea é uma prática hoje largamente utilizada durante cirurgias cardíacas, consistindo no desvio do sangue do paciente para um circuito externo ao corpo, que substituirá as funções do coração e dos pulmões. Por intermédio de uma tubulação plástica, o sangue desviado é feito passar através de uma bomba (coração artificial) e, posteriormente, através de um oxigenador (pulmão artificial), retornando então à circulação original do paciente. Existem também elementos para a filtração e para o controle da temperatura do sangue. Tal procedimento permite ao cirurgião realizar complexas intervenções cardiovasculares com o coração parado, ao mesmo tempo em que é mantida a necessária circulação sanguínea para o cérebro e outros tecidos do corpo [1].

O balão intra-aórtico é um sistema utilizado em, por exemplo, pacientes que não possam ser simplesmente afastados da circulação extracorpórea, necessitando ainda de alguma assistência cardíaca até que ocorra uma melhor recuperação do seu miocárdio. Consiste num balão que é posicionado no interior da artéria aorta através de um catéter, sendo inflado após o fechamento da válvula aórtica e desinflado logo antes da sístole [2]. Representa uma assistência circulatória.

Em pacientes onde tratamentos farmacológicos rigorosos mostram-se inadequados e o balão intra-aórtico ineficiente, têm sido utilizados mais recentemente alguns modelos de

bombas de sangue para assistência ventricular, com a finalidade de aliviar o trabalho de bombeamento do coração de uma maneira mais radical do que o faz o balão intra-aórtico [2-3]. A aplicação mais frequente deste tipo de equipamento diz respeito à assistência ventricular esquerda, embora o ventrículo direito também necessite de assistência em alguns casos.

Técnicas clínicas e cirúrgicas cada vez mais sofisticadas têm resultado em aumentos substanciais nos tempos de vida de indivíduos portadores de uma série de anomalias no coração. Entretanto, há situações em que o coração encontra-se irremediavelmente comprometido, não sendo mais capaz de realizar suas funções de uma maneira satisfatória. O transplante cardíaco tem sido então utilizado com sucesso nos últimos anos.

O primeiro transplante de coração em um ser humano data do final da década de 60, tendo sido realizado na África do Sul pelo Dr. Barnard. Os transplantes cardíacos difundiram-se rapidamente a partir de então, passando a ser realizados em diversos países (os primeiros transplantes cardíacos no Brasil foram realizados pela equipe do Dr. Zerbini). Embora a técnica cirúrgica do transplante se encontrasse bem dominada pelos médicos da época, persistia ainda um grave problema de difícil solução: o novo órgão era normalmente causador de forte rejeição por parte do organismo que o recebia, resultando normalmente na morte do paciente. Devido a este grande risco pós-operatório, que poderia manifestar-se a curto ou a longo prazo, a prática do transplante cardíaco ficou durante diversos anos praticamente em desuso. Diversos laboratórios concentraram esforços na descoberta de agentes inibidores da rejeição, tentando assim viabilizar a retomada dos transplantes.

A descoberta da Ciclosporina - A (um poderoso agente imunossupressor) resultou num grande impulso para a volta da prática dos transplantes de coração, abrindo a chamada "Era da Ciclosporina". Uma vez superado o fantasma da rejeição, o número de corações transplantados tem prosseguido até hoje sofrendo aumentos substanciais, inclusive no Brasil. Entretanto, o fator que mais limita hoje a difusão dos transplantes cardíacos é a grande dificuldade encontrada na

obtenção do doador do órgão, que é alguém que tenha sofrido morte cerebral mas que ainda possua o coração em bom estado. Alguns países criaram programas de integração entre hospitais visando agilizar a procura de órgãos; podemos citar os programas USATX (EUA), GTX (Alemanha), JPTX (Japão) e SPTX (Brasil).

Um grande problema relacionado aos transplantes de coração diz respeito ao sincronismo entre o momento da necessidade do órgão e o da disponibilidade do doador. Este problema é mais facilmente contornado quando o coração do paciente candidato a receptor ainda se encontra funcionando satisfatoriamente, podendo então o momento do transplante ser determinado em função do aparecimento do doador. Há casos, entretanto, em que o coração do paciente não mais consegue mantê-lo vivo, sendo pois urgente a tomada de alguma providência (isto ocorre muitas vezes devido a complicações surgidas durante uma intervenção cirúrgica no coração). Como existe em geral um intervalo de tempo mínimo até que seja possível encontrar-se um doador com as características adequadas, deverá então nestes casos ser estabelecida uma "ponte" entre o instante da necessidade do órgão e o instante da sua disponibilidade. Este papel de ponte para transplante tem sido desempenhado em algumas ocasiões por diferentes modelos de bombas artificiais de sangue, permitindo em alguns casos a manutenção da vida do paciente por muitos dias até a localização de um doador [3-4].

Centros de pesquisas espalhados por diversos países encontram-se atualmente trabalhando no desenvolvimento do coração artificial implantável, para substituição total e permanente do coração natural de indivíduos condenados ao estado de falência cardíaca [5-6]. As experiências até hoje realizadas neste campo ainda são bastante limitadas, mas as perspectivas para o futuro são bastante promissoras.

2.2 HISTÓRICO SOBRE O DESENVOLVIMENTO DAS BOMBAS DE SANGUE

Uma vez demonstrado o importante papel que as bombas artificiais de sangue desempenham dentro do contexto da medicina, cabe agora traçarmos um panorama histórico sobre a

evolução de tais aparelhos em suas mais diversas configurações até os dias de hoje. O início da crescente utilização das bombas artificiais de sangue esteve intimamente ligado aos primórdios da cirurgia cardíaca com circulação extracorpórea, datando da primeira metade deste século. Por esta época, os maiores esforços concentravam-se no aperfeiçoamento do oxigenador de sangue, sendo a bomba considerada apenas um acessório de menor importância. Entretanto, este conceito foi sendo revisto à medida em que o desenvolvimento das técnicas cirúrgicas foram exigindo melhorias no desempenho das máquinas coração-pulmão artificial. Atualmente é muito intenso o trabalho para se otimizar o projeto das bombas de sangue, visando inclusive a substituição definitiva do coração natural pelo coração artificial em certos casos mais críticos.

Registros em hieróglifos egípcios indicam que a relação existente entre a pulsação periférica e as batidas do coração já era conhecida no ano 3.000 a.C.. É sabido também que os gregos e romanos já possuíam um conhecimento razoável da anatomia do coração e dos principais vasos sanguíneos. Por outro lado, ainda não estava estabelecido naquela época o conceito de que o sangue circula num circuito fechado sendo bombeado pelo coração. Tal conceito já aparecia, entretanto, em obra de William Harvey publicada em 1628. A ele é atribuída a concepção moderna da circulação sanguínea.

Bernstein et al. [7] apresentaram em 1965 um interessante resumo histórico sobre os mais significativos avanços da tecnologia do bombeamento artificial de sangue até aquela época. As primeiras bombas utilizadas para a perfusão de órgãos isolados de que se tem conhecimento foram as de Jacoby (1898). Issekutz (1927) foi o primeiro a utilizar uma bomba de roletes, com o intuito de estudar o mecanismo de ação da insulina. Dale e Schuster construíram na Inglaterra (1928) um par de bombas de diafragma; o mesmo princípio foi mais tarde utilizado por Dennis (1951) em um grande número de experimentos com animais. Outras inovações foram introduzidas por Gibbs (1930), Barcroft (1933), Henry e Jouvet (1934) e De Baakey (1934). As cirurgias com o coração aberto começaram a acontecer em 1937, quando Gibbon divulgou a primeira aplicação do aparelho coração-pulmão artificial empreendida com sucesso em animais.

Foi usada então uma bomba de Dale-Schuster ativada por gás comprimido. Novos tipos de equipamentos para circulação extracorpórea foram surgindo então, de forma que o número de modelos disponíveis já era superior a 30 em 1951.

O ano de 1953 ficou definitivamente marcado dentro da história da medicina, devido ao pioneirismo de John Gibbon em realizar com sucesso uma intervenção cirúrgica no interior do coração de uma paciente, utilizando-se de circulação extracorpórea com bomba de roletes. Intervenções deste tipo são hoje uma rotina em uma grande quantidade de hospitais espalhados pelo mundo, sendo que as bombas de roletes são ainda as mais utilizadas.

Jarvik [5] descreveu em seu artigo algumas tentativas feitas até 1981 para a construção de um coração artificial implantável. Kolff e Akutsu realizaram em 1957 os primeiros experimentos com corações deste tipo. Utilizando uma bomba acionada por ar comprimido, conseguiram manter a vida de cachorros pelo tempo aproximado de uma hora e meia; Kolff e seu grupo de Cleveland (EUA) desenvolveram nos anos seguintes alguns modelos inovadores de coração artificial, não obtendo porém o sucesso desejado. A técnica cirúrgica de implante do coração artificial ainda não se encontrava bastante desenvolvida naquela época, dificultando ainda mais o trabalho dos pesquisadores. Em 1963 o Congresso dos EUA destinou uma verba especial para o desenvolvimento de projetos sobre coração artificial naquele país [6]. Em 1968 começaram nos EUA estudos visando à construção de um coração artificial movido por energia nuclear, totalmente implantável e com autonomia para 10 anos de funcionamento; este coração resultou porém num aparelho complicado, volumoso e caro, sem o esperado sucesso.

Um coração artificial foi implantado pela primeira vez em um ser humano no ano de 1969, por Denton A. Cooley, do Texas (EUA). Este coração funcionou durante 64 horas como ponte para transplante. Os progressos alcançados durante a década de 70 no campo dos corações artificiais implantáveis podem ser acompanhados pelo gráfico da Fig. 1. Os resultados mais significativos até hoje obtidos, inclusive com alguns implantes em seres humanos, dizem respeito ao coração Jarvik-7. Este é composto por dois ventrículos artificiais

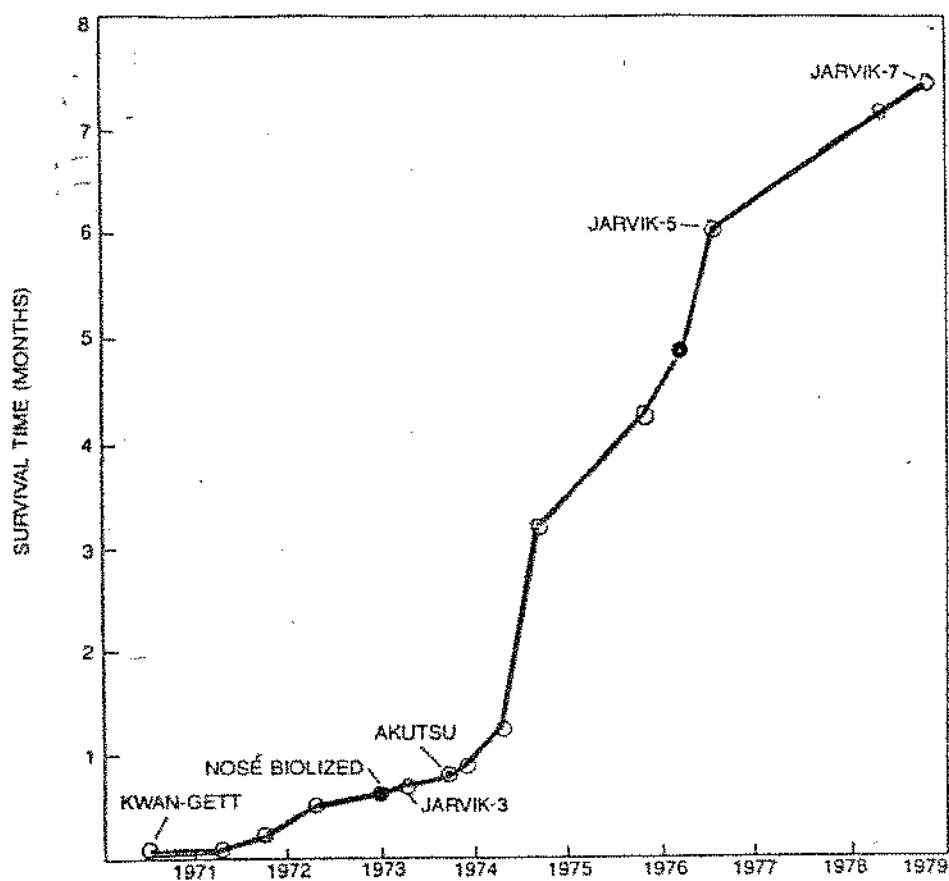


Fig.1 Curva de sobrevivência de animais implantados com seis diferentes corações artificiais durante a década de 1970 [5].

com diafragmas acionados por ar comprimido, tendo sido desenvolvido por uma equipe de Utah (EUA). Alguns modelos de bombas de sangue acionados por conversores eletro-mecânicos foram revisados por Nosé em 1986 [8].

As bombas acima apresentadas classificam-se entre as bombas de deslocamento, isto é, deslocam uma certa quantidade de fluido definida pelas dimensões e pela geometria da máquina; podem ser alternativas (como as bombas de diafragma) ou rotativas (como as bombas de roletes).

As duas últimas décadas foram, no entanto, marcadas pela utilização de uma outra classe de bombas para impulsionar o sangue: as bombas de fluxo. Tais bombas caracterizam-se por possuírem um elemento rotativo (rotor) que transmite continuamente energia mecânica ao fluido. São geralmente de dimensões mais reduzidas, prestando-se bem para grandes vazões e pressões relativamente baixas (contrariamente às bombas de deslocamento). As bombas de fluxo mais comuns são as bombas centrífugas.

Já em 1960, Saxton et al. [9] levantaram algumas vantagens inerentes às bombas centrífugas em aplicações cardiovasculares. Num esforço conjunto, um grupo da Universidade de Minnesota e a Medtronic, Inc. (MN - EUA) apresentaram em princípios da década de 70 um modelo de bomba centrífuga de sangue, onde um rotor constituído por algumas pás e acionado magneticamente impulsiona o sangue de forma contínua e controlada [10]. Esta bomba contou com algumas aplicações nos anos que se seguiram, caindo em desuso tempos depois por motivos que discutiremos mais adiante (item 2.5.4).

Um novo conceito de bomba centrífuga de sangue apareceu em 1976, sob a forma de uma bomba de cones desenvolvida por Kletschka e Rafferty, sendo até hoje produzida comercialmente pela Biomedicus, Inc. (MN - EUA) sob o nome de Biopump [11]. Esta bomba tem sido utilizada em substituição às bombas de roletes em diversas aplicações, com uma série de vantagens que discutiremos mais adiante (item 2.5.3).

2.3 PROBLEMAS ENCONTRADOS NO BOMBEAMENTO ARTIFICIAL DO SANGUE

O bombeamento artificial do sangue é uma tarefa bastante delicada e que pode acarretar uma série de inconvenientes ao paciente. É fundamental ao projetista da bomba o conhecimento profundo de tais problemas, pois deverá ser feito todo o possível para que seus efeitos sejam minimizados até níveis aceitáveis sob o ponto de vista médico.

Os principais inconvenientes associados à passagem do sangue por uma bomba artificial dizem respeito ao traumatismo sofrido por suas células e à formação de coágulos [12]. Alguns outros problemas de mais fácil solução também poderão estar presentes, como veremos um pouco mais adiante.

A passagem do sangue através de próteses e órgãos artificiais está comumente associada à existência de hemólise, isto é, à ruptura das hemácias com a consequente liberação de hemoglobina no plasma [1]. A ocorrência de hemólise em níveis superiores aos aceitáveis pelo organismo pode resultar numa série de graves consequências ao paciente, como anemia, necessidade de transfusão de sangue e até mesmo o óbito. O grau em que ocorre a hemólise depende do nível de tensões a que as hemácias são submetidas e também do tempo de exposição destas células aos agentes causadores de trauma. As máquinas de circulação extracorpórea hoje mais largamente utilizadas (com bombas de roletes) causam um grau de traumatismo ao sangue que proíbe o seu uso contínuo por períodos superiores a algumas poucas horas. Substitutos para as bombas de roletes têm sido pesquisados nos últimos tempos. Uma série de fatores relativos à mecânica do escoamento do sangue no interior de uma bomba e aos materiais utilizados na fabricação desta está sendo pesquisada com o intuito de minimizar a ocorrência de hemólise. Projetos mais recentes de bombas têm resultado em progressos substanciais neste sentido, permitindo assim sua utilização por períodos bem mais longos (como ponte para transplante, por exemplo). Vale lembrarmos ainda que a hemólise não é o único tipo de traumatismo que deverá ser levado em consideração no projeto de uma bomba de sangue; a destruição mecânica das plaquetas representa

também um grave inconveniente, pois diminui a capacidade de coagulação do sangue e pode resultar em hemorragia [13].

O outro grande risco envolvido no bombeamento artificial do sangue é a formação de coágulos ou trombos [13]. Estes trombos podem ser levados pelo fluxo sanguíneo até o interior da circulação do paciente, podendo causar trombozes de graves consequências. Além disto, os coágulos formados interferem no bom funcionamento da própria bomba. Grande atenção deverá portanto ser devotada pelo projetista ao desenho mecânico da bomba e à seleção dos materiais utilizados em sua fabricação.

A formação de coágulos constitui-se atualmente no maior inconveniente encontrado na utilização das bombas de sangue por períodos mais prolongados, sendo que nenhuma solução satisfatória foi até hoje encontrada para sanar este problema. A prática atual para remediar esta questão consiste na adição de anticoagulantes ao sangue (principalmente a Heparina) com todos os riscos de hemorragia envolvidos [1,13-14]. Uma outra solução que tem sido testada é o revestimento das superfícies artificiais de contato sanguíneo com anticoagulantes, porém sem o sucesso esperado.

O aparecimento de bolhas de ar durante o bombeamento do sangue também deverá ser evitado, pois a penetração destas na circulação do paciente pode resultar no risco letal de uma embolia [11]. O perigo de uma infecção também deverá sempre ser considerado, principalmente enquanto existir algum corte de acesso ao interior do corpo do paciente.

A interação de qualquer órgão de um indivíduo com o restante de seu organismo é sempre um processo complexo e bastante desenvolvido, englobando inclusive uma série de sofisticados mecanismos de controle. Assim, a substituição de um órgão natural por um órgão artificial acarreta algumas consequências fisiológicas que deverão ser previstas e dominadas. No caso do coração, isto fica mais crítico quando a substituição ocorre por um período prolongado. Exemplificando: um coração artificial implantável deverá responder bem às alterações do débito cardíaco causadas pelas diversas necessidades fisiológicas do organismo do

paciente, sob diferentes condições (repouso, exercício, etc.). Deverá então ser previsto algum mecanismo de controle, por exemplo do tipo Frank-Starling [15].

2.4 FLUXO PULSÁTIL OU NÃO-PULSÁTIL?

A questão que vamos abordar agora é se a presença de um fluxo pulsátil de sangue, como o gerado pelo coração, é ou não necessária para a manutenção de uma boa qualidade de vida nos mamíferos. Elevado número de estudos tem sido realizado desde o início deste século com o intuito de se obter uma resposta conclusiva à pergunta acima colocada. Os resultados obtidos mostram-se confusos, sendo esta uma matéria ainda controversa. As experiências com fluxos não-pulsáteis descritas na literatura foram realizadas com diferentes animais e sob diferentes condições, dificultando assim a análise destas.

Os equipamentos de circulação extracorpórea atualmente em uso lançam mão de bombas de roletes ou, mais recentemente, de bombas centrífugas. Estas bombas fornecem um fluxo não-pulsátil de sangue durante períodos relativamente curtos. A grande controvérsia diz respeito às aplicações de longo prazo. A maior parte dos esforços até hoje dispendidos no sentido de se buscar um substituto temporário ou permanente para o coração concentrou-se no desenvolvimento de bombas de deslocamento alternativas, de fluxo pulsátil, as quais procuram reproduzir o funcionamento do órgão natural [5]. Entretanto, diversos grupos encontram-se atualmente pesquisando modelos de corações artificiais que forneçam fluxos não-pulsáteis [21,23-24].

Yozu et al. [16] traçaram em 1985 um panorama histórico sobre os resultados até hoje obtidos com experimentos utilizando fluxo não-pulsátil de sangue. Alguns efeitos negativos foram computados ao longo da história, como o aumento das resistências vasculares sistêmica e pulmonar e o decréscimo no volume de urina. Entretanto, resultados obtidos por diferentes pesquisadores têm se mostrado muito contraditórios. Ainda deve ser considerado o fato de que, na maioria das vezes, as experiências clínicas são realizadas com uma série de outros fatores alterando conjuntamente as

funções orgânicas, tais como: anestesia, cirurgia, hemodiluição, hipotermia, hemólise, tratamento anti-coagulante e outras peculiaridades. Isto tudo torna muito difícil uma clara interpretação dos resultados.

Muitos pesquisadores vêm defendendo a não necessidade de um fluxo pulsátil, tendo obtido resultados animadores em seus estudos. Uma equipe de Cleveland [16] relatou em 1985 a sobrevivência por mais de 3 meses em condições fisiológicas próximas às normais de 5 animais bovinos utilizando duas bombas centrífugas "Medtronic" (uma para cada ventrículo). Magovern et al. [14] descreveram também em 1985 suas experiências clínicas num hospital de Pittsburgh (EUA) utilizando a bomba centrífuga "Biopump", concluindo que um fluxo essencialmente não-pulsátil pode ser mantido com sucesso durante alguns dias. Outros resultados neste sentido ainda podem ser encontrados na literatura [20,24-25].

Vale a pena destacarmos aqui o conteúdo de um editorial publicado em 1988 pelo Dr. Nosé [17] (Cleveland-EUA), após muitos anos de pesquisa e grandes investimentos dedicados por sua equipe ao desenvolvimento de bombas pulsáteis de sangue. O Dr. Nosé destacou neste editorial diversas vantagens das bombas não-pulsáteis de sangue sobre as pulsáteis (controle mais simples, maior rendimento, maior durabilidade, menores dimensões, ausência de válvulas, etc.), e também concluiu que diversos resultados negativos com o uso de fluxos não-pulsáteis descritos na literatura foram devidos ao pouco tempo de adaptação dos organismos vivos a esta nova condição fisiológica.

2.5 ALGUNS MODELOS DE BOMBAS DE SANGUE

Bombas dos mais diversos tipos já foram empregadas através da história para impulsionar o sangue. Muitas delas caíram em desuso após algum tempo de experiências, por não se enquadrarem às rigorosas exigências impostas a qualquer aparelho artificial posto a interagir com um organismo vivo. Seguem abaixo as descrições de alguns modelos de bombas de sangue que, por algum motivo, merecem ser aqui destacados.

2.5.1 BOMBA DE ROLETES

é uma bomba de deslocamento positivo, rotativa e que fornece um fluxo essencialmente não-pulsátil. Uma haste pivotada em seu centro e com um rolete em cada extremidade gira a uma velocidade que pode ser variada através de controles do aparelho. Durante parte do percurso desenvolvido pelos roletes, estes passam sobre um tubo flexível, deformando-o e impulsionando o sangue que passa pelo interior deste. A Fig. 2 apresenta um esquema típico de bomba de roletes.

Assim como nos outros modelos de bomba a serem descritos mais adiante, na bomba de roletes o sangue não entra em contato com o ar ou com outros elementos externos, reduzindo pois o risco de contaminações.

Esta é uma bomba simples e econômica; apresenta entretanto uma série de inconvenientes:

- Devido ao seu próprio princípio de funcionamento (esmagamento do tubo), resulta num alto grau de traumatismo sanguíneo. Isto impede que seja utilizada ininterruptamente por períodos superiores a algumas horas.
- Apresenta o risco de introdução de bolhas no fluxo de sangue.
- A periódica deformação do tubo pode resultar na liberação de pequenas partículas de material sintético no sangue (podendo causar embolia) ou mesmo na sua ruptura.

As bombas de roletes ainda são as mais utilizadas em aplicações de circulação extracorpórea. Inclusive o Brasil enquadra-se entre os países fabricantes dessas bombas. Porém, as grandes limitações encontradas em seu funcionamento aliadas à crescente necessidade de aumento dos tempos de perfusão vêm resultando na busca de novos modelos de bombas para substituir as de roletes. Alguns centros médicos dispersos pelo mundo já fazem uso de bombas centrífugas ou de bombas pulsáteis em algumas aplicações, principalmente nas de longo prazo.

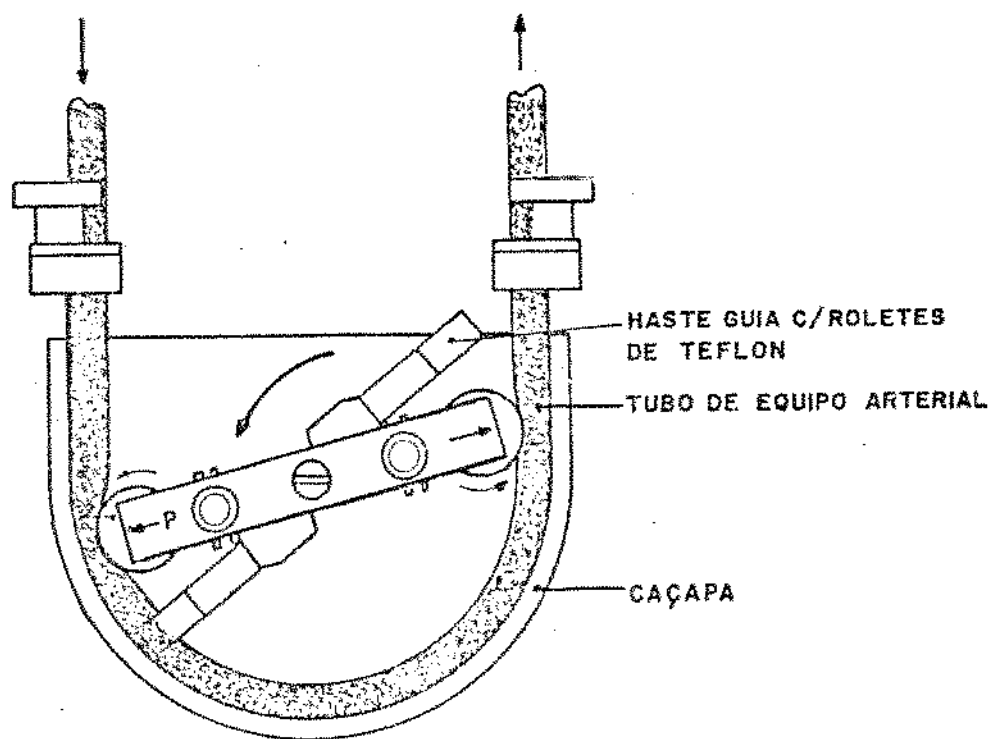


Fig.2 Representação esquemática de uma bomba de roletes típica.

2.5.2 BOMBAS PULSÁTEIS

São bombas de deslocamento positivo e alternativas, sendo portanto de fluxo pulsátil. Os grandes esforços que têm sido até hoje dedicados ao aperfeiçoamento dessas bombas de sangue podem ser explicados pelo fato de seu princípio de funcionamento procurar reproduzir o do próprio coração. Existem modelos com apenas um compartimento (ventrículo), para assistência ventricular, e modelos com dois compartimentos, para a substituição total do coração. As bombas pulsáteis que atualmente encontram-se em fase de desenvolvimento são acionadas pneumaticamente ou por meio de energia elétrica (Figs. 3,4). As bombas acionadas eletricamente contam, para o seu funcionamento, com conversores eletromecânicos de energia ou com motores térmicos especializados [8].

Apenas como exemplo, vamos mostrar com o auxílio da Fig. 5 o funcionamento de uma bomba pulsátil de diafragma dotada de dois ventrículos. Cada um dos ventrículos é dividido em duas câmaras através de uma membrana flexível (diafragma). A câmara que entra em contato com o sangue é servida por duas válvulas cardíacas artificiais, sendo uma de entrada e outra de saída. A outra câmara entra em contato com o circuito pneumático de acionamento por ar comprimido. Durante a diástole, a pressão do ar é diminuída e o sangue penetra no ventrículo pela válvula de entrada; a pressão do ar é então aumentada na sístole, fazendo com que a membrana se distenda e empurre o sangue através da válvula de saída para dentro das artérias.

Este tipo de ventrículo artificial é dotado de um mecanismo de controle análogo à Lei Frank-Starling do coração: quanto mais sangue retornar ao ventrículo, mais sangue será bombeado. Apesar das aparentes vantagens de ter-se uma bomba semelhante ao coração, alguns inconvenientes ainda podem ser apontados neste modelo: apresenta diversas peças móveis; possui válvulas artificiais, cujos problemas já são conhecidos em procedimentos de substituição de válvulas cardíacas; sua construção e seu sistema de controle são complexos; possui baixo rendimento energético; as bombas implantáveis acionadas pneumaticamente precisam contar com um compressor posicionado externamente ao corpo e tubos de ar comprimido atravessando a pele; as bombas implantáveis

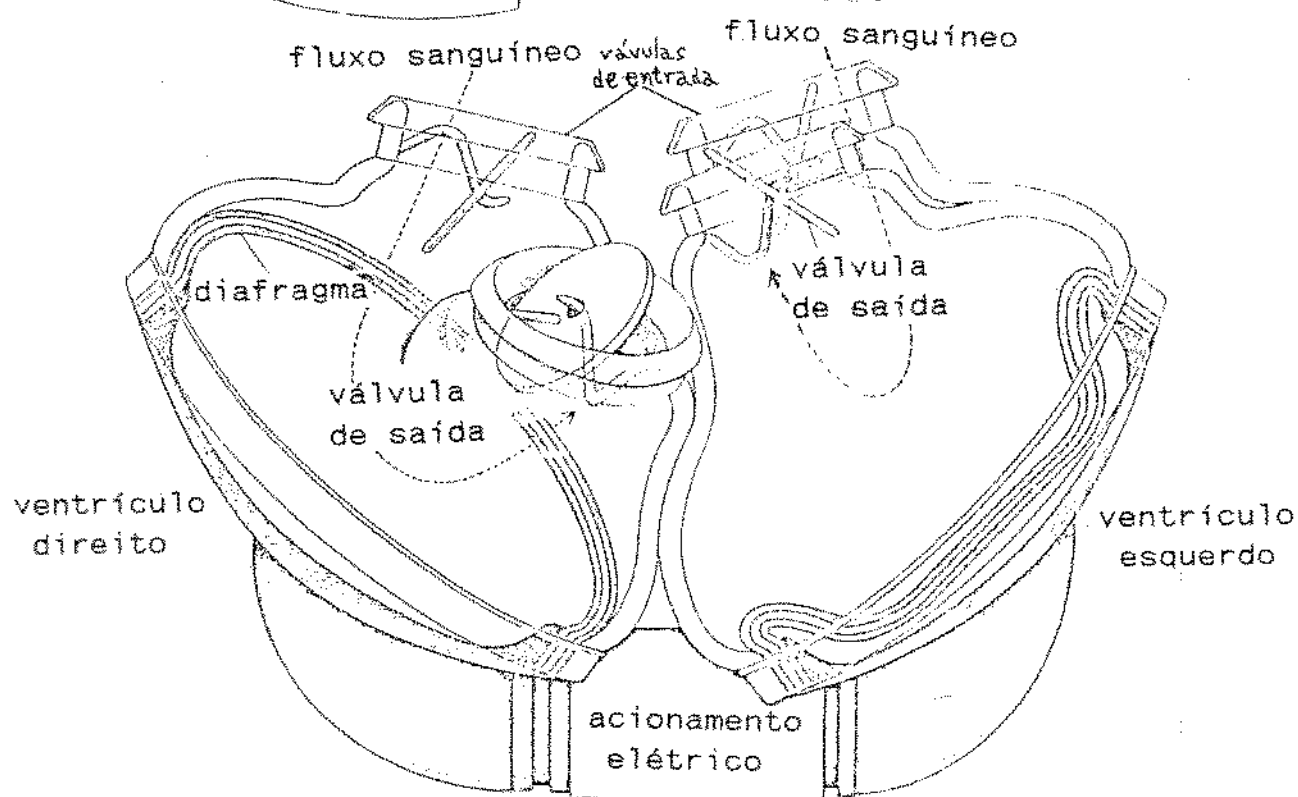


Fig. 3 Coração artificial "Jarvik-7", de acionamento pneumático [5].

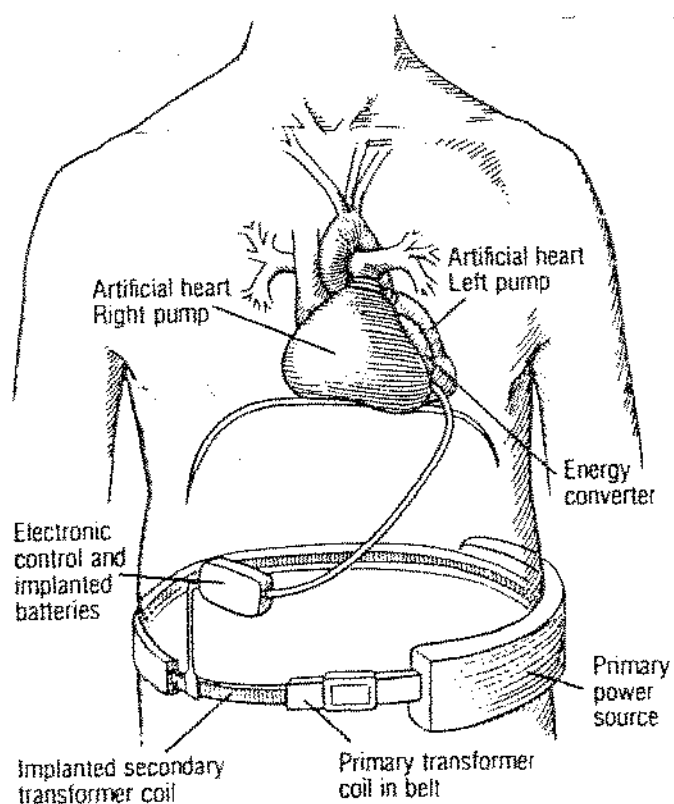


Fig. 4 Representação do implante de um coração artificial pulsátil de acionamento elétrico [6].

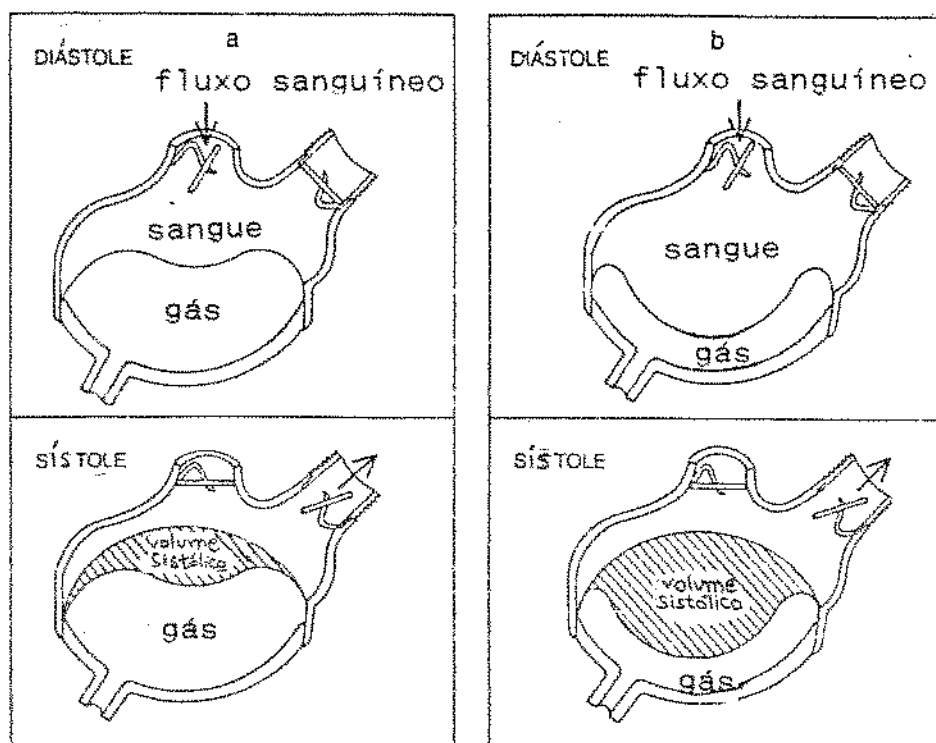


Fig. 5 Princípio de funcionamento de uma bomba pulsátil de diafragma, acionada pneumaticamente [51].

acionadas eletricamente precisam contar com câmaras de complacência.

A maior parte dos grupos que atualmente pesquisam bombas de sangue optou pela construção de modelos pulsáteis. Algumas aplicações destas bombas já foram realizadas em seres humanos, como por exemplo os implantes do coração artificial de Jarvik [17] e o emprego do ventrículo artificial Pierce-Donachy para assistência ventricular [2,3]. Atualmente, estas bombas são apenas empregadas para assistência ventricular. Experiências de construção de ventrículos pneumáticos já foram realizadas em São Paulo (Brasil), tanto no Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia como no Instituto do Coração (INCOR).

2.5.3. Biopump

O modelo "Biopump" é uma bomba centrífuga de sangue produzida pela Biomedicus, Inc. (MM-EUA), e que fornece um perfil não-pulsátil de pressão. É constituída de uma carcaça acrílica de formato aproximadamente cônico, contendo em seu interior um rotor composto por três peças sobrepostas entre si, também cônicas e possuindo superfícies lisas. O rotor possui ainda um ímã permanente posicionado em sua base, e é apoiado na carcaça da bomba através de um mancal apropriado (Fig. 6). O sangue adentra a bomba através de uma conexão situada em seu vértice, passando então a escoar por entre os cones. O movimento de rotação do rotor transmite energia cinética ao sangue por efeito de arrasto viscoso (atrito) em suas superfícies de contato. O sangue é posto assim a girar, sendo finalmente expulso do interior da bomba por uma saída tangencial encontrada em sua base, pelo efeito da aceleração centrífuga. O acionamento do rotor dá-se magneticamente através da carcaça, fazendo com que o sangue encontre-se totalmente isolado do meio exterior. A Biopump fixa-se a um módulo eletrônico que possui uma série de funções: acionamento do rotor, monitorização e controle de parâmetros funcionais (velocidade do rotor e vazão do sangue), alarmes para situações anormais, etc.

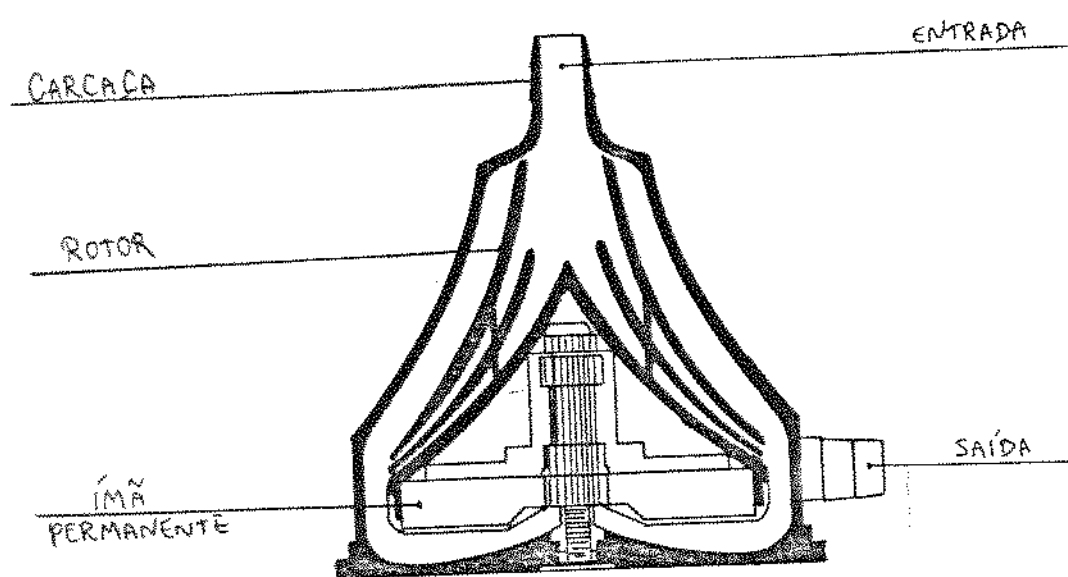


Fig.6 Bomba centrífuga "Biopump" [11],

Uma série de qualidades operacionais desta bomba tem garantido o seu emprego em diversas aplicações desde que foi lançada no mercado, em meados da década de 70 [11]:

- Ensaios "in vitro" demonstraram que o índice de hemólise causado por esta bomba é baixo comparativamente a outros modelos de bombas artificiais de sangue [18].
- Possui apenas uma peça móvel (rotor).
- Sua operação é muito segura, sendo praticamente imune a quebras e introdução de bolhas de ar na circulação do paciente.
- A pressão fornecida pela bomba não aumentará se a linha arterial for obstruída por qualquer motivo, impedindo assim acidentes como a ruptura de tubos ou desconexões.
- Responde bem à falta de sangue na entrada, por dificultar o surgimento de pressão negativa na linha venosa.
- Operação simples e auto-controle bastante eficiente, adaptando-se bem às necessidades fisiológicas do organismo.
- As bombas são previamente esterilizadas, são descartáveis e mantém o sangue isolado do meio exterior, minimizando pois o risco de contaminações.

Todos estes fatores mostram que este tipo de bomba centrífuga apresenta um grande número de vantagens se comparado às bombas de roletes ou às bombas pulsáteis. Isto explica o facto de alguns hospitais estarem optando por empregar estas bombas em assistência ventricular e também em circulação extracorpórea (em substituição às tradicionais bombas de roletes).

Lynch et al. [11] apresentaram em 1984 um relato de 1027 pacientes submetidos a circulação extracorpórea com a Biopump, desde 1977 até 1982. Birnbaum et al. [19] relataram em 1987 suas experiências com 24 pacientes submetidos a assistência ventricular com a Biopump, obtendo resultados considerados animadores.

Um problema ainda encontrado na utilização da Biopump diz respeito à coagulação do sangue em seu interior, principalmente na região do mancal. Isto tem sido contornado com a

utilização de heparina (agente anti-coagulante) ou com a substituição periódica da bomba - normalmente a cada 6 ou 12 horas. No Brasil este modelo de bomba já encontra algumas aplicações.

2.5.4 BOMBA MEDTRONIC

Este é um modelo de bomba centrífuga de sangue que chegou a ser produzido comercialmente pela Medtronic, Inc. (MN-EUA), sendo a energia cinética transmitida ao sangue através de um rotor dotado de um conjunto de pás (Fig. 7 [10]). Como no modelo anterior, também nesta bomba o acionamento do rotor é realizado por via magnética. Esta bomba fornece normalmente um fluxo não-pulsátil de sangue; entretanto, experiências já foram realizadas com o intuito de se obter um fluxo pulsátil com esta bomba, variando-se para isto a velocidade de seu rotor.

O funcionamento desta bomba conta com algumas das vantagens inerentes às bombas centrífugas, descritas no item anterior. Entretanto, apresenta alguns aspectos negativos se comparada à Biopump: a hemólise causada já não é desprezível, e o perigo de ocorrência de bolhas de ar e efeito de sucção estão presentes - além do problema da formação de trombos (coágulos). Estes fatores determinaram então o desuso em que caiu esta bomba. Chegou no entanto a prestar alguns serviços, tendo sido utilizada em algumas aplicações clínicas e também em diversos experimentos com animais para o estudo do efeito de um fluxo não-pulsátil de sangue [20].

2.5.5 BOMBA CENTRÍFUGA COM MANCAL MAGNÉTICO

Um novo modelo bastante promissor de bomba centrífuga de sangue foi apresentado em 1982 por Bramm et al. [12]. Este modelo segue um mecanismo de bombeamento semelhante ao da Biopump, constituindo-se porém de um rotor metálico com a forma de dois cones contrapostos pela base que operam em paralelo no interior de uma carcaça por onde escoar o sangue (Fig. 8). Esta bomba apresenta todas as vantagens inerentes às bombas centrífugas de sangue, além de não apresentar o

grande problema que ainda persiste na Biopump, que se refere à formação de coágulos na região do apoio do rotor. A eliminação deste problema foi conseguida através do emprego de um sistema de mancal magnético que elimina totalmente o contato mecânico entre o rotor e a carcaça da bomba: o rotor mantém-se flutuando no interior da bomba por ação de um campo magnético controlado eletronicamente. O acionamento do rotor também é feito por via magnética, assim como na Biopump.

A resolução de alguns problemas ligados, entre outros, à redução das dimensões externas da bomba e ao armazenamento da energia elétrica necessária para o seu funcionamento, poderão indicar este modelo como sendo um dos mais recomendáveis para funcionar no futuro como um coração artificial implantável [15,21].

2.5.6 ALGUNS OUTROS MODELOS

Diversos outros modelos recentes de bombas de sangue podem ser encontrados descritos na literatura, sendo alguns comentados abaixo.

Encontra-se disponível atualmente no mercado um modelo de bomba centrífuga de sangue produzido pela Centrimed, Corp (MN - EUA), que possui^{ur} rotor formado por pequenas pás que impulsionam o sangue [22].

Utilizando-se do conceito de cones rotativos para arrastar o sangue, uma equipe austríaca começou a desenvolver há alguns anos protótipos de bombas centrífugas de sangue [23], um dos quais pode ser visto na Fig. 9.

Unger et al. [24-25] apresentaram uma bomba axial de sangue constituída por uma carcaça em forma de U e de uma hélice posicionada no meio do percurso do sangue. Esta bomba foi projetada visando à eliminação do problema da formação de coágulos, apresentando entretanto um índice de hemólise elevado.

Affeld et al. [26] apresentaram em 1986 um conceito totalmente novo em bombeamento artificial de sangue, ao

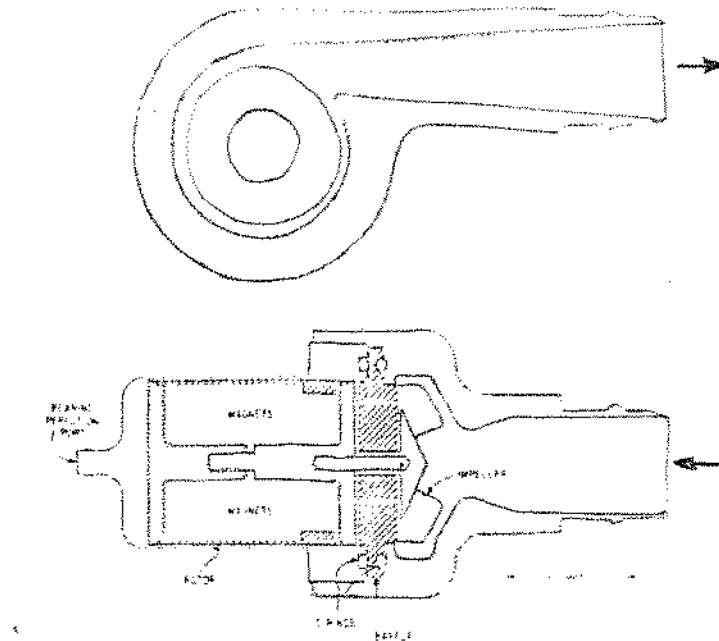


Fig.7 Bomba centrífuga "Medtronic" [10].

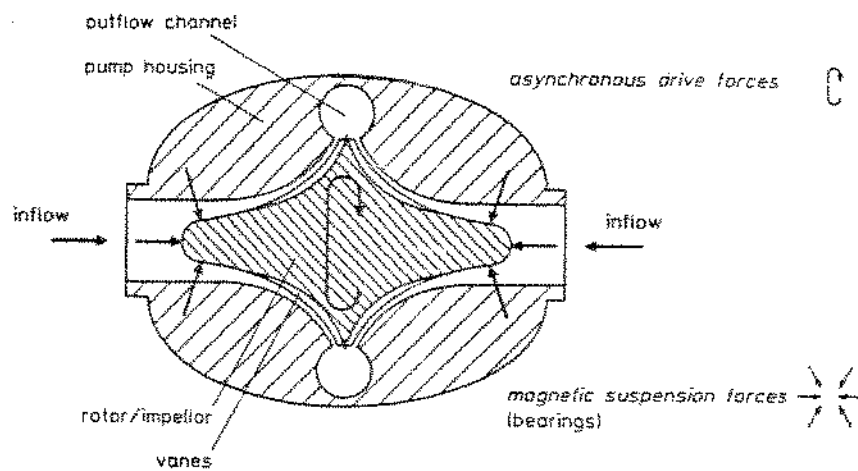


Fig.8 Bomba centrífuga com mancais magnéticos [21].

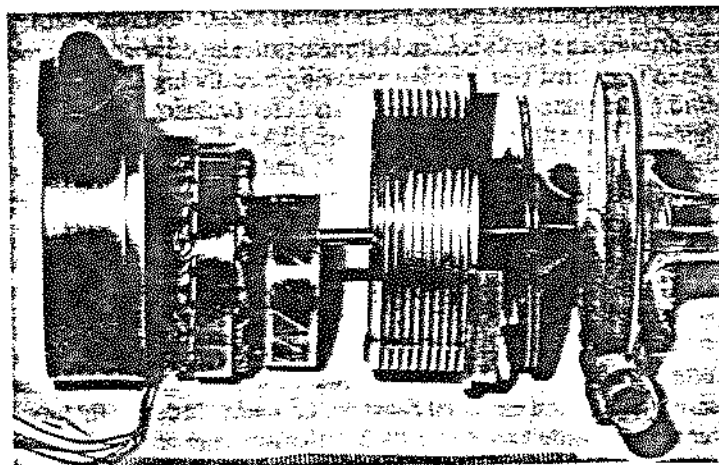


Fig.9 Bomba centrífuga austríaca [23].

fazerem com este o mesmo que uma colher faz com o chá dentro de uma xícara.

2.6 REQUISITOS PARA UMA BOMBA CENTRÍFUGA DE SANGUE

O trabalho que ora apresentamos tem como objetivo contribuir para o projeto e construção de uma bomba centrífuga de sangue funcionando sob o princípio do arrasto viscoso entre uma ou mais superfícies lisas e o sangue. Uma série de exigências funcionais, operacionais e construtivas que deverão ser perseguidas pelo projeto são descritas abaixo.

1. A bomba deverá ser projetada visando-se a sua utilização como parte integrante de equipamentos de circulação extracorpórea e também como ponte para transplante. Isto implica na possibilidade de utilização contínua da bomba por períodos muito superiores aos permitidos pelas bombas de roletes. Consequentemente, a bomba não poderá causar traumatismos ao sangue em níveis superiores aos máximos limites toleráveis pelo organismo, e o problema da formação de trombos deverá ser minimizado na medida do possível. O volume interno deverá ser reduzido.
2. O rotor da bomba deverá ser projetado de modo a que forneça a necessária energia ao sangue para realizar a perfusão e, ao mesmo tempo, para vencer a resistência ao escoamento imposta pelo circuito artificial utilizado (cânulas, oxigenador, etc.) nos níveis fisiológicos de vazão.
3. Deverão ser evitadas no escoamento as zonas de estagnação, por favorecerem estas a formação de coágulos. Cavitação e regiões de regimes turbulentos não deverão existir, pois estes fatores tendem a causar traumatismos sanguíneos. Também por este motivo deverão ser evitados altos valores de tensão de cisalhamento [12]. Quanto às superfícies artificiais em contato com o sangue, é preferível que sejam lisas, homogêneas e de dimensões reduzidas.
4. A introdução de bolhas de ar no escoamento sanguíneo deverá ser evitada.

5. O projeto do mancais do rotor deverá ser desenvolvido com especial cuidado, considerando-se os problemas de desgaste mecânico, aquecimento, formação de coágulos, hemólise, fugas e outros.
6. A bomba deverá ser construída com materiais que se adaptem convenientemente às aplicações biomédicas, isto é, que sejam biocompatíveis.
7. Os riscos de quaisquer tipos de infecções deverão ser reduzidos o quanto possível. O equipamento deverá evitar a contaminação do sangue com elementos externos, além de ser facilmente esterilizável.
8. O calor gerado pela bomba deverá ser de valor reduzido (rendimento alto) e facilmente dissipável. A presença de regiões quentes em contato com o sangue estimula os fenômenos de coagulação e hemólise, sendo portanto indesejável.
9. Outros problemas mecânicos a serem resolvidos dizem respeito ao desenho da carcaça (incluindo os canais de entrada e de saída do sangue) e à definição dos processos de fabricação dos componentes.
10. Alguns problemas de ordem elétrica são: acionamento e controle de velocidade do rotor (anexo B), monitorização do fluxo de sangue, sistemas de segurança (alarmes e bateria), e o que mais se faça necessário.
11. Todo o aparelho médico-hospitalar que envolva a passagem de corrente elétrica deve ser cuidadosamente projetado para evitar a ocorrência de choques elétricos, de acordo com as normas técnicas sobre este assunto.
12. A confiabilidade operacional da bomba deverá ser bastante grande durante toda a sua vida útil prevista. Seu manejo deverá ser simples, rápido e eficiente.
13. O projeto do equipamento deverá procurar soluções de baixos custos de produção e operacional, facilitando a sua futura colocação no mercado.

14. Redução das dimensões internas da bomba para que seja retirado menos sangue do sistema circulatório natural para o sistema extracorpóreo.
15. Visando a uma futura evolução deste projeto para um coração artificial implantável, mais algumas características se destacam: modificações no rotor para redução das tensões de cisalhamento, dimensões adaptadas à anatomia humana, fonte de energia duradoura ou facilmente recarregável, funcionamento silencioso, vida útil longa, sistema de controle automático de acordo com as condições fisiológicas momentâneas do organismo, outras.

2.7 PERSPECTIVAS PARA O FUTURO

Uma das mais promissoras perspectivas para o futuro no campo do tratamento de cardiopatias diz respeito ao coração artificial implantável. Algumas poucas experiências de implante permanente já foram realizadas nos EUA com o coração Jarvik-7, mas os resultados obtidos indicam que existem ainda muitas questões a serem resolvidas antes que os corações artificiais possam ser implantados em larga escala.

As bombas não-pulsáteis de sangue mostram-se superiores às bombas pulsáteis sob o ponto de vista da Engenharia. As vantagens destas bombas têm sido ultimamente destacadas por diversos pesquisadores [16,17]. A tendência atual é aceitar o fato de o organismo dos mamíferos se adaptar a uma circulação não-pulsátil.

Algumas limitações relacionadas às atuais bombas artificiais de sangue precisam ser melhor resolvidas antes que os corações artificiais possam ser implantados com tranquilidade. Já foram tratados neste trabalho os problemas do traumatismo sanguíneo, da formação de coágulos e do controle do débito cardíaco.

Outra grande questão diz respeito à fonte de energia para o funcionamento do coração artificial. Uma das soluções mais promissoras consiste na utilização de sistemas que associam indução magnética de energia através da pele e acumuladores de energia elétrica [8].

Além dos problemas técnicos e fisiológicos envolvidos, ainda devem ser lembradas as questões éticas, sociais e econômicas que se colocam frente à larga utilização de corações artificiais. Em função de todos os problemas descritos acima, os objetivos mais imediatos das pesquisas sobre bombas artificiais de sangue estão atualmente voltados prioritariamente para o desenvolvimento de aparelhos destinados apenas à assistência ventricular [6].

III - PARTE EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

A parte experimental deste trabalho foi desenvolvida junto ao Centro Técnico de Pesquisas e Experimentos (CTPE) do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia (IDPC - São Paulo/SP), com os seguintes objetivos principais:

1. Verificação empírica da validade da proposta de construção de uma bomba centrífuga com rotor de superfície lisa, funcionando sob o princípio de bombeamento pelo arrasto fluidodinâmico.
2. Obtenção de alguns resultados iniciais a serem utilizados como subsídios para uma futura otimização do projeto.
3. Definição de métodos de ensaios a serem empregados na avaliação de uma bomba centrífuga de sangue.
4. Verificação experimental da validade do modelo matemático desenvolvido e apresentado no Capítulo 4.

Podemos subdividir este trabalho experimental em duas etapas distintas, as quais serão abordadas aqui com algum nível de detalhe.

Projetamos e construímos inicialmente um protótipo da bomba centrífuga de sangue, tendo em vista os requisitos apontados no item 2.6 e adotando uma forma construtiva relativamente simplificada sob o ponto de vista do acionamento e do apoio do rotor da bomba.

Projetamos e construímos então uma bancada de teste para o levantamento das curvas características do comportamento fluidodinâmico da bomba. Realizamos os ensaios e obtivemos uma série de resultados que serão apresentados no Capítulo 6.

3.2 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

O projeto mecânico da bomba engloba na verdade uma série de subprojetos que devem ser desenvolvidos de maneira racional e harmônica, resultando num produto que venha atender aos requisitos inicialmente estabelecidos. Os desenhos do rotor e da carcaça da bomba, o projeto do mancal e a definição dos materiais e processos de fabricação dos componentes são alguns dos principais problemas mecânicos a serem resolvidos.

Durante o projeto do primeiro protótipo da bomba centrífuga de sangue (PT-01), preocupamo-nos principalmente com a geometria interna da bomba e deixamos para o futuro a definição de outros aspectos importantes do projeto. Tratando-se de um protótipo destinado apenas à obtenção de alguns resultados iniciais, procuramos na medida do possível desenhar geometrias regulares, de forma a facilitar assim a fabricação dos componentes.

O Anexo C traz um desenho de conjunto do protótipo PT-01 da bomba centrífuga de sangue, sendo fornecidas as suas dimensões principais. A bomba tem uma forma curva aproximadamente cônica, sendo constituída basicamente por uma carcaça e por um rotor localizado em seu interior. O fluido é admitido na bomba a partir de uma tubulação localizada em seu vértice superior, passando a escoar entre a carcaça e o rotor. O movimento rotativo deste último resulta na transferência de momento ao fluido através do atrito em sua superfície. O fluido é posto assim a girar, dirigindo-se para a periferia pelo efeito centrífugo; a descarga dá-se através de uma saída tangencial posicionada na parte inferior da bomba. Definimos o acionamento do rotor mecanicamente por meio de um motor elétrico convencional de corrente contínua com velocidade variável, deixando para o futuro o desenvolvimento definitivo do acionamento e do mancal do rotor.

Construtivamente, a carcaça divide-se em duas partes, sendo a peça superior chamada de tampa e a inferior de base. Ambas as peças são flangeadas e se encaixam convenientemente: há arruelas espaçadoras entre as flanges e quatro parafusos de fixação atravessando as flanges e as arruelas. A vedação

entre a tampa e a base da carcaça mó-se por meio de um anel O (de borracha). O eixo do motor atravessa a carcaça através de um furo na base, sendo a vedação aí realizada por meio de um retentor convencional.

A base foi usinada a partir de uma chapa de acrílico transparente, nas oficinas do IDPC.

A fabricação da tampa cônica foi inicialmente tentada através da moldagem de resina acrílica entre um macho e uma fêmea torneados em madeira, tendo sido a fêmea executada em três peças desmontáveis para efeito de desmoldagem. Devido a algumas dificuldades na manipulação da resina, optamos finalmente pela usinagem da tampa cônica a partir de um bloco de acrílico transparente. A conexão tangencial do eixo foi torneada separadamente e posteriormente colada à tampa, onde foi usinado um furo para a passagem do fluido. A construção da carcaça em acrílico transparente permitiu a visualização do interior da bomba por ocasião dos ensaios.

O rotor foi usinado em material plástico nas oficinas do IDPC.

Para a obtenção de resultados experimentais mais completos, possibilitando a determinação empírica do efeito de diversas variações geométricas internas da bomba sobre o desempenho desta, previmos a possibilidade de alterações nos espaçamentos entre o rotor e a base e entre a tampa e a base da bomba através do simples intercâmbio de arruelas de espessuras variáveis. Ainda no Anexo C encontram-se representadas as seis configurações internas diferentes da bomba obtidas através deste procedimento, incluindo a configuração básica (PT - e1 - A).

3.3 EXPERIMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

3.3.1 TIPOS DE ENSAIOS POSSÍVEIS

O procedimento que se segue à construção de um protótipo é naturalmente a sua experimentação exhaustiva, para que se possa avaliar os mais diversos aspectos de seu funcionamento e efetuar uma otimização do seu projeto. Vamos comentar

apora diversos tipos de experimentos que devem ser realizados durante o desenvolvimento de uma bomba artificial de sangue, antes que esta possa vir a ser utilizada em aplicações hospitalares.

Trataremos inicialmente de algumas importantes modalidades de ensaios "in vitro", os quais são mais empregados principalmente durante as fases iniciais do desenvolvimento de qualquer equipamento médico. Para o caso específico de uma bomba centrífuga de sangue, destacam-se os ensaios descritos abaixo.

1. Levantamento das curvas características da bomba - Ensaio destinado à determinação das características fluidodinâmicas globais da bomba, onde podem ser levantadas curvas de altura manométrica, potência e rendimento em função da vazão (fluxo) do fluido que a atravessa, para diversos valores diferentes de velocidade de rotação do rotor. A realização deste ensaio requer a utilização de uma bancada de teste, podendo o sangue ser substituído por um fluido com características físicas semelhantes que seja de manipulação mais fácil, sem prejuízos significativos na precisão dos resultados.

2. Visualização do escoamento no interior da bomba - Encontra-se na literatura a descrição de diversos métodos para a visualização do escoamento de fluidos com o auxílio de corantes, partículas de alumínio, etc. Tal visualização é importante para uma maior compreensão dos fenômenos físicos que estão realmente ocorrendo no interior da bomba, como a identificação de vórtices e de regiões submetidas a maiores turbilhamentos, trazendo assim subsídios para a otimização de seu projeto.

3. Traumatismos causados ao sangue - Um certo volume de sangue é feito escoar continuamente através de um circuito hidráulico fechado incluindo a bomba. O sangue deve estar heparinizado (tratamento contra coagulação) e deve ter a sua temperatura controlada. São colhidas periodicamente amostras de sangue para exame laboratorial do grau de traumatismo sofrido por este (índice de hemólise, etc.) durante o ensaio. É importante que se garanta que, com exceção da bomba, nenhum outro componente do circuito cause

traumatismos significativos ao sangue, para que não haja um "mascaramento" dos resultados [27,28].

4. FORMAÇÃO DE COÁGULOS E AQUECIMENTO - Um certo volume de sangue (não heparinizado) é feito escoar continuamente durante um certo intervalo de tempo através de um circuito hidráulico fechado incluindo a bomba. Findo o ensaio, são estudados possíveis efeitos de formação de coágulos no interior da bomba [29] e desnaturação do sangue por aquecimento.

Convém lembrarmos finalmente que qualquer desenvolvimento de um novo equipamento médico destinado a interagir com seres humanos deve contar com exaustivos ensaios "in vivo" realizados com animais, devendo obviamente estes ensaios serem realizados dentro de procedimentos éticos aceitos de tratamento com seres vivos.

Para o cumprimento dos objetivos descritos na introdução deste capítulo (item 3.1), ensaiamos exaustivamente o protótipo construído para a obtenção do levantamento de suas curvas características. As outras modalidades de ensaios descritas acima seriam necessárias apenas numa etapa futura da evolução do projeto, ficando aqui como sugestão.

3.3.2 A BANCADA DE TESTE

A bancada de teste para o levantamento das curvas características do protótipo foi construída procurando-se, na medida do possível, a utilização de componentes encontrados ou fabricados no próprio IDPC. A Fig.10 apresenta esquematicamente os principais componentes da bancada, seguindo-se então uma breve descrição de cada um destes. O Anexo D traz algumas fotografias mostrando o conjunto da bancada e alguns de seus detalhes.

Os itens descritos abaixo referem-se aos componentes representados na Fig.10.

1. Motor

Motor elétrico de corrente contínua e velocidade variável, para o acionamento do rotor da bomba.

2. Bomba Centrífuga

Bomba centrífuga cujas curvas características estão sendo levantadas com o auxílio da bancada de teste.

3. Manômetro de Sucção

Manômetro de coluna de mercúrio, para a medição da pressão do líquido na secção de entrada da bomba. A pressão é medida no nível da secção de descarga.

4. Torniquete

Tipo de válvula (fabricada em plástico no IDPC) que funciona pelo esmagamento do tubo flexível, por acção de um pino rosqueado. Sua principal função é o controle da pressão de sucção da bomba.

5. Registro Hidráulico

Válvula de PVC para o controle do fluxo que vai da tubulação de descarga diretamente para a tubulação de sucção da bomba.

6. Reservatório Aquecido

Reservatório do fluido de teste, dotado de aquecedor, termostato e termómetro para o controle da temperatura deste.

7. Registro Hidráulico

Válvula de PVC para o controle do fluxo que segue desde a bomba até o reservatório aquecido.

8. Fluxómetro

Rotómetro para a medição da vazão do líquido que está atravessando a bomba.

9. Manômetro de Descarga

Manômetro de coluna de mercúrio, para a medição da pressão do líquido na secção de descarga da bomba.

10. Controlador de Velocidade

Controlador eletrônico da velocidade do motor de corrente contínua que aciona o rotor da bomba.

A bomba (2) foi afixada sobre uma pequena mesa de madeira através de um sistema de pinos de latão e arruelas de

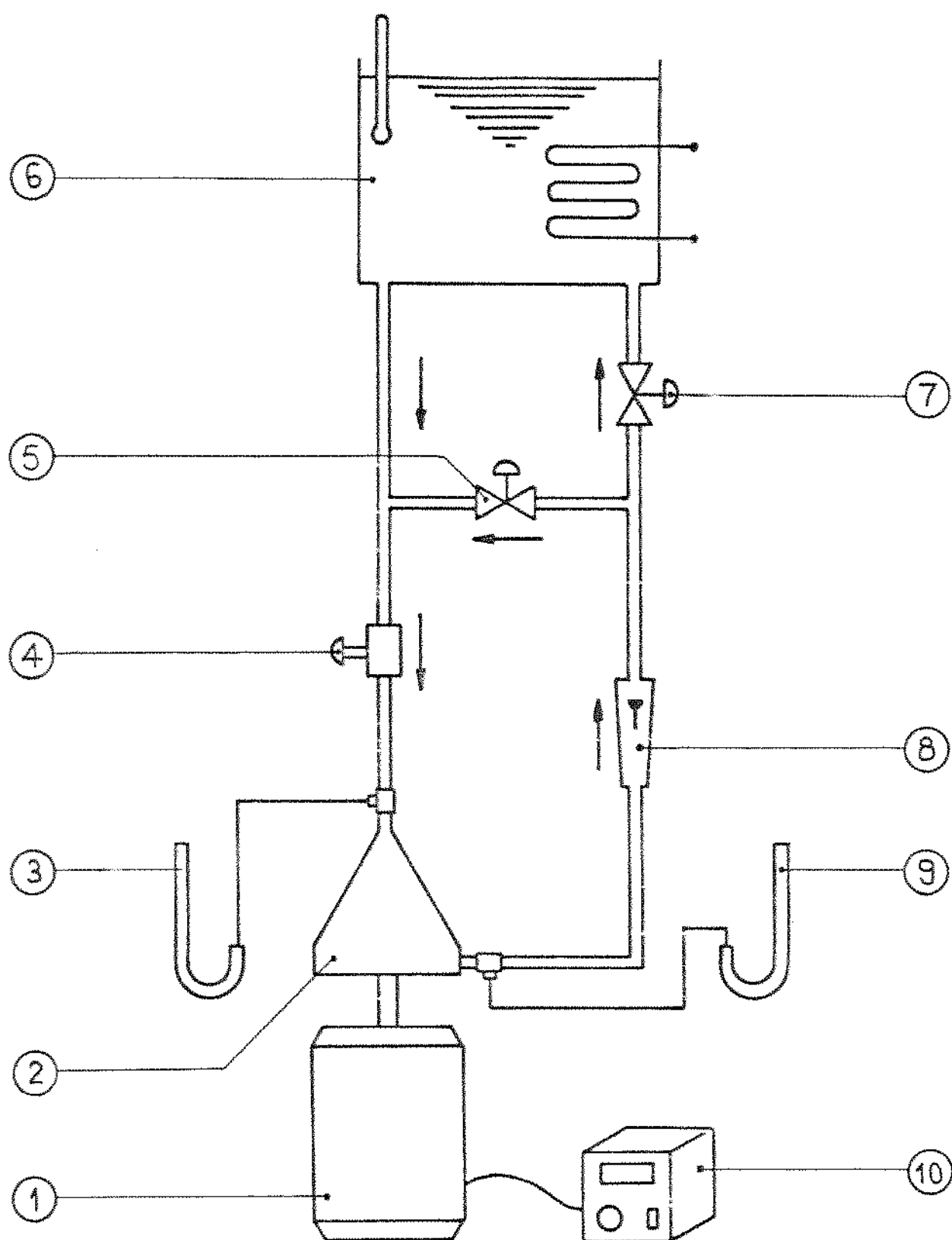


Fig.10 Representação esquemática da bancada de teste utilizada para o ensaio do protótipo.

diferentes espessuras, de modo a permitir diversas opções geométricas distintas na disposição interna da bomba. O motor (1) foi posicionado na parte inferior da mesa, com o seu eixo atravessando um furo na madeira para acoplar-se diretamente ao rotor da bomba, através de uma luva de latão solidária a este eixo. A medição da velocidade de rotação do rotor da bomba foi realizada com um tacômetro analógico posto em contato com a ponta do eixo oposta do motor. O controlador (10) foi capaz de acionar o motor até uma velocidade máxima de 2.000 rotações por minuto.

O reservatório aquecido (6) foi pendurado numa haste hospitalar para soro, prevendo-se a possibilidade de variação de sua altura em função da pressão requerida na sucção da bomba.

Foram utilizadas como tubulações mangueiras flexíveis de PVC, sendo que para a tubulação localizada entre o reservatório e a sucção da bomba foi escolhido um diâmetro maior de forma a diminuir a perda de carga neste segmento do circuito hidráulico, garantindo assim uma pressão de sucção positiva mesmo para fluxos altos. Pelo mesmo motivo utilizamos o torniquete (4) ao invés de um registro hidráulico convencional, pois este último está sempre associado a uma perda de carga inerente a si próprio.

As pressões manométricas de sucção e de descarga da bomba foram medidas através de duas tomadas de pressão convenientemente interligadas a duas colunas de mercúrio (3) e (9). As colunas foram posicionadas em cotas iguais (da descarga da bomba) para que a diferença entre as leituras de ambas já fornecesse uma compensação automática do desnível entre as seções de entrada e de saída da bomba.

Para a medição da vazão de líquido que atravessa a bomba, projetamos, construímos e calibramos no IDPC um rotâmetro (8) destinado a medir fluxos (vazões) dentro da faixa de trabalho utilizada nos ensaios. O seu corpo foi usinado em material acrílico, consistindo de duas peças rosqueadas entre si; o seu flutuador foi montado com um pedaço de chumbo associado a um pequeno pino estabilizador de aço. O rotâmetro foi calibrado com o líquido de teste da bancada para fluxos de 0 a 5 l/min.

A Fig.10 mostra que o circuito hidráulico da bancada de teste foi projetado de forma a prever dois caminhos diferentes para o fluxo que deixa o rotâmetro após ser descarregado pela bomba: a parcela do fluxo que passa pela válvula (7) retorna ao reservatório aquecido, ao passo que a parcela do fluxo que passa pela válvula (5) retorna diretamente à tubulação de sucção da bomba sem passar pelo reservatório. Esta última opção foi incluída com o intuito de se diminuir a perda de carga total inerente ao próprio circuito, possibilitando assim estendermos o levantamento das curvas até regiões de vazões maiores. Notemos que o reservatório (6) foi deixado numa posição alta o suficiente para garantir uma pressão positiva na sucção da bomba. Esta pressão situou-se sempre entre 0 e 50 mmHg (relativa ao nível da sucção).

Para cada valor de velocidade do rotor, o manejo conveniente das válvulas (5) e (7) e do torniquete (4) permitiu-nos o levantamento da respectiva curva característica da bomba, desde 0,5 l/min até a máxima vazão permitida pelo circuito, com as válvulas totalmente abertas nesta última condição.

O fluido escolhido para simular o sangue foi uma mistura líquida com características físicas semelhantes às características deste, composta por 42% de glicerina e 58% de água destilada. Seu peso específico é levemente superior ao do sangue, e sua viscosidade à temperatura ambiente é aproximadamente igual à viscosidade do sangue à temperatura do corpo [30,31]. As influências do aquecimento do fluido pela própria bomba e das variações de temperatura ambiente foram anuladas durante os ensaios com o controle da temperatura do fluido no reservatório aquecido (6), dentro da faixa de 28 a 30 graus C. Eventuais bolhas de ar existentes no circuito foram removidas antes do início de cada ensaio.

Os resultados experimentais obtidos estão disponíveis no Capítulo 6.

IV - MODELAMENTO MATEMÁTICO

4.1 INTRODUÇÃO

De uma maneira simultânea mas absolutamente independente em relação ao trabalho experimental apresentado no capítulo anterior, realizamos um estudo teórico objetivando o desenvolvimento de um modelo matemático para o cálculo aproximado do escoamento do sangue através da bomba centrífuga.

Para o desenvolvimento deste modelo, fizemos uma idealização física da configuração da bomba centrífuga comparando-a por meio de uma analogia a um sistema de dois discos planos e paralelos entre si, sendo um disco rotativo e o outro estacionário. Deduzimos então uma série de equações matemáticas que descrevem aproximadamente o escoamento do fluido no interior deste sistema de discos. Obtivemos assim um modelo matemático parabolizado, escrito para um espaço bidimensional e passível de ser resolvido em microcomputador para a realização de simulações numéricas.

Após a comprovação da validade deste modelo matemático através da confrontação dos seus resultados com os resultados experimentais obtidos (Capítulo 5), este poderá ser utilizado futuramente para a otimização do projeto da bomba com a grande vantagem de substituir o trabalho de fabricação e experimentação de diversos protótipos apenas pela realização de rápidas e econômicas simulações em computador.

Apresentaremos neste capítulo a dedução completa deste modelo matemático, incluindo todas as hipóteses e simplificações assumidas nos cálculos.

4.2 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

é de vital importância, em uma série de aplicações práticas, a solução teórica de problemas envolvendo escoamento de fluidos de uma maneira geral. Assim, a Mecânica dos Fluidos

tem se constituído num dos mais importantes e, ao mesmo tempo, complexos problemas a serem resolvidos pelos métodos da Matemática Aplicada. Até hoje, entretanto, apenas escoamentos relativamente simples conseguiram ser resolvidos analiticamente por métodos matemáticos exatos. Como consequência, muitos esforços têm sido dispendidos durante as últimas décadas na busca de métodos numéricos aproximados cada vez mais precisos, rápidos e eficientes. Dentro deste contexto, o advento do computador digital representou o início de um acelerado e contínuo processo de aperfeiçoamento desses métodos.

A análise, por exemplo, de um escoamento tridimensional, viscoso, compressível, variável com o tempo, turbulento e com geometrias complicadas, é um problema altamente complexo que requer a resolução das equações de Navier-Stokes na sua forma mais geral [32], juntamente com as equações da continuidade, da energia e de estado, com as adequadas condições iniciais e de contorno. Esta é uma tarefa que hoje somente pode ser realizada, na maioria dos casos, com a adoção de uma série de hipóteses simplificadoras e de métodos numéricos bastante especializados.

McNally e Sockol [33] apresentaram em 1985 uma extensa revisão bibliográfica com ênfase na aplicação de métodos computacionais a escoamentos em turbo-máquinas, tratando principalmente do emprego de métodos de diferenças finitas na resolução das equações de Euler e das equações de Navier-Stokes em suas formas parabólica, parcialmente parabólica e elíptica. Mueller [34] apresentou em 1978 alguns exemplos de aplicação do método das diferenças finitas a escoamentos fisiológicos. Podem ser encontradas ainda na literatura aplicações de diversos outros métodos à resolução de problemas fluidodinâmicos, tais como: método dos elementos finitos, método de Galerkin, métodos espectrais e outros.

Um extenso trabalho de revisão bibliográfica resultou na seleção de alguns artigos tratando da análise de escoamentos que, de alguma forma, se identificam com o problema que queremos resolver. A maior parte destes artigos trata do estudo teórico e experimental do escoamento de um fluido através de uma classe bastante particular de máquinas de fluxo - as bombas e turbinas de discos múltiplos (ou de

viscosidade). O rotor de uma máquina deste tipo é constituído por uma série de discos lisos dispostos paralelamente entre si e abertos no centro, entre os quais escoo o fluido. A transferência de momento entre os discos e este fluido dá-se unicamente por efeito de atrito viscoso. No caso das bombas centrífugas, o fluido escoo do centro para a periferia do rotor, tomando o sentido inverso no caso das turbinas. Tais máquinas têm sido estudadas com vistas a algumas aplicações bastante específicas, tais como aplicações espaciais, em submarinos, com fluidos de alta viscosidade, etc. Algumas de suas características são o baixo nível de vibrações, alta improbabilidade de surgimento de cavitação, simplicidade construtiva e, como desvantagem, um rendimento relativamente baixo.

Em 1987, Roddy et al. [35] fizeram uma análise teórica do escoamento de um fluido através do rotor de uma bomba de discos, considerando condições de escoamento incompressível, regime permanente e simetria axial. Trabalhando com valores médios das variáveis ao longo da espessura (espaçamento entre dois discos vizinhos), eles empregaram um coeficiente de atrito calculado em função do raio. Considerações de momento resultaram numa equação diferencial ordinária de primeira ordem, a qual foi resolvida numericamente pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem. Foi feita uma análise dimensional afim de se apresentarem os resultados sob uma forma mais genérica. Foram calculados diversos valores de potências e rendimentos em função da vazão do fluido, os quais foram comparados com os resultados de um trabalho experimental paralelamente desenvolvido. Entretanto, constatamos após um estudo detalhado deste artigo que esta análise teórica não levou devidamente em conta as perdas oriundas do escoamento radial (comparar com o nosso modelo matemático, apresentado mais adiante).

Rice [36] desenvolveu em 1963 uma investigação teórica e experimental sobre a bomba de discos múltiplos, investigação esta que foi estendida em 1965 para o caso de uma turbina [37]. As hipóteses feitas por Rice foram basicamente as mesmas feitas por Roddy et al. [35], com a diferença de ter sido assumido um coeficiente de atrito constante ao longo dos discos. Foram escritas duas equações de movimento, uma para a direção tangencial e outra para a direção radial.

Hasinger e Kehrt [38] estudaram teórica e experimentalmente, em 1963, o problema da bomba de discos múltiplos, assumindo uma distribuição parabólica da velocidade tangencial ao longo da espessura e calculando as diversas perdas separadamente.

Boyd e Rice [39] resolveram em 1968 as equações de Navier-Stokes parabolizadas para o caso de escoamento entre dois discos de uma turbina, tendo sido desenvolvido um método de diferenças finitas. O mesmo método foi estendido por Rice e Mc Alistar [40] em 1970 para o escoamento de um fluido entre dois cones paralelos e rotativos. Em 1971 Boyack e Rice [41] apresentaram um método integral que substituiu com vantagens o método que fora apresentado em 1968 [39].

Todos os trabalhos acima comentados tratam do escoamento de um fluido entre dois discos finitos e paralelos entre si, sendo ambos girantes. Quando o escoamento se dá entre um disco rotativo e um disco estacionário, surgem diversos novos efeitos (como escoamentos secundários) que tendem a aumentar a complexidade da análise; métodos numéricos mais poderoso ou novas hipóteses simplificadoras devem então ser adotados.

Szeri et al. [42] apresentaram em 1983 uma análise teórica e experimental sobre o escoamento de um fluido entre dois discos finitos e paralelos entre si, considerando diversas situações diferentes de rotações desses discos. A análise teórica foi desenvolvida através de um modelo matemático tridimensional bastante preciso, com base num método de Galerkin. Entretanto, somente foram conseguidas soluções para uma reduzida faixa de variação dos parâmetros adimensionais envolvidos.

Para resolver o problema de um gás que escoa entre um disco flexível rotativo e um disco rígido estacionário, Pelech e Shapiro [43] desprezaram, em 1964, um grande número de termos das equações de Navier-Stokes, através de uma análise de ordem de grandeza. Em 1960 Daily e Nece [44] estudaram o escoamento relacionado ao caso de um disco girando no interior de um cilindro estacionário, através de uma análise de camada limite.

4.3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Vamos estabelecer agora os principais aspectos do problema teórico que queremos resolver, sendo que o item 4.4 cuidará da apresentação detalhada do modelo matemático por nós desenvolvido.

O objetivo básico deste estudo teórico é a descrição matemática do escoamento de um fluido que se movimenta entre dois discos rígidos, planos, finitos e dispostos paralelamente entre si com um espaçamento b, sendo um disco rotativo (com velocidade angular constante) e o outro estacionário.

Na configuração representada na Fig.11, o disco 1 gira com uma velocidade angular Ω constante, ao passo que o disco 2 está imóvel. Existe um orifício no centro do disco 1, por onde o fluido é admitido continuamente. O disco rotativo, sobre o qual é aplicado um-torque externo, induz por efeito de arrasto um movimento tangencial no fluido. Este, devido a um efeito centrífugo, movimenta-se radialmente para a periferia adquirindo momento à medida em que caminha. O fluido realiza assim um movimento espiralado em relação a um referencial estacionário, e temos portanto um efeito de bombeamento.

Existe na verdade um escoamento tridimensional entre os discos. Para verificarmos isto, vamos analisar fisicamente o comportamento de cada uma das componentes da velocidade absoluta local do fluido, tomadas no sistema de coordenadas cilíndricas representado na Fig 11.

1. Para cada posição radial, a velocidade tangencial local (v) do fluido varia axialmente, de alguma forma, de um valor igual a Ωr junto ao disco 1 até um valor nulo junto ao disco 2.

2. A componente radial (u) da velocidade local do fluido vale zero junto a cada um dos discos, e seu perfil de distribuição axial sofre distorções devido à diferença entre as velocidades angulares dos dois discos. Estando o disco 1 girando e o disco 2 parado, o efeito centrífugo

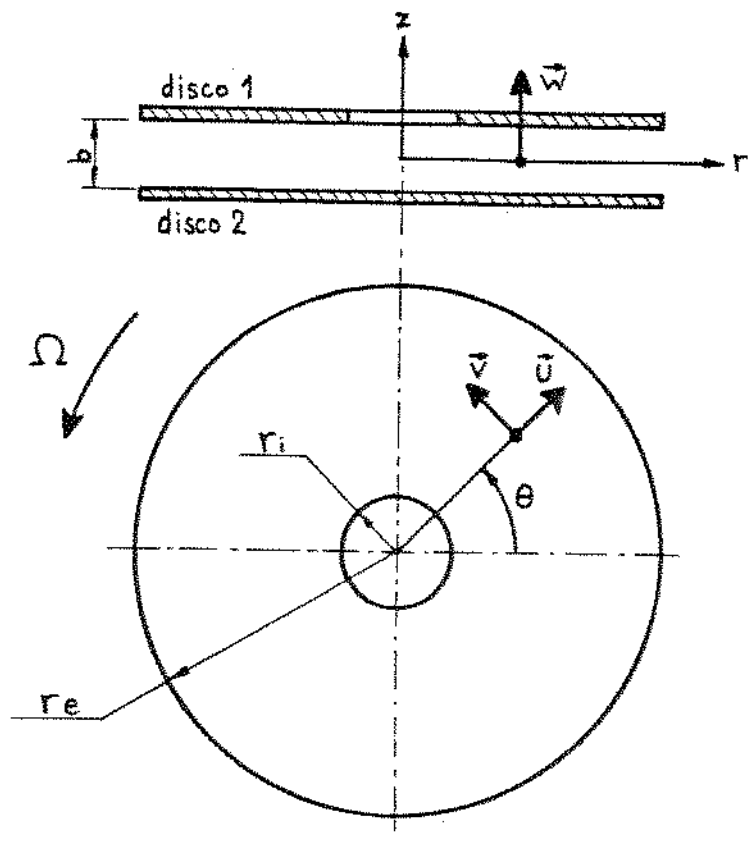


Fig.11 Configuração adotada para o desenvolvimento do modelo matemático.

sobre o fluido faz-se sentir preponderantemente nas proximidades do primeiro, aumentando assim o valor da componente radial de sua velocidade nesta região, como compensação deste efeito, existe uma diminuição no valor desta mesma componente nas proximidades do disco estacionário. Sob condições de uma velocidade relativamente alta do disco 1 e de uma vazão relativamente baixa através da bomba, pode chegar a surgir um escoamento reverso radial (rumo ao centro) junto ao disco 2, podendo também aparecerem células de recirculação [42] e instabilidades no escoamento.

3. O surgimento da componente axial (w) da velocidade local do fluido pode ser interpretado como uma consequência do comportamento das outras duas componentes tratadas acima.

Para condições de regime permanente (todas as derivadas em relação ao tempo nulas), simetria axial (todas as derivadas em relação a θ nulas) e de escoamento incompressível (densidade constante), o objetivo de uma análise rigorosa deste problema seria a obtenção dos valores das componentes da velocidade absoluta local do fluido nas três direções (r , θ , z) e do valor da pressão (p), para cada ponto do espaço abrangido pelo fluido, em função de uma série de dados de entrada. Isto seria feito através da resolução das equações de Navier-Stokes (representando a 2a. lei de Newton) na forma abaixo representada (1), juntamente com a equação da continuidade na sua forma diferencial (2) e ainda com a imposição das condições de contorno adequadas. As equações (1) e (2) encontram-se expressas em coordenadas cilíndricas, e o fluido possui uma densidade (massa específica) ρ e uma viscosidade cinemática ν [39].

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\nabla^2 u - \frac{u}{r^2} \right) \\ \mu \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{uv}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= \nu \left(\nabla^2 v - \frac{v}{r^2} \right) \\ \mu \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w \end{aligned} \quad (1)$$

Não foram consideradas forças de campos, e o operador ∇^2 tem a seguinte expressão

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

A equação da continuidade pode ser escrita como

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Nota-se, que este é um sistema de equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem, cuja solução, como já foi comentado anteriormente, é um problema extremamente complexo e que atualmente, na maioria dos casos, somente pode ser resolvido de maneira aproximada e com o auxílio de laboriosos artifícios de cálculo.

4.4 DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Apresentamos a seguir uma dedução completa do modelo matemático por nós desenvolvido para o cálculo aproximado do escoamento de um fluido através do par de discos descritos no item 4.3. Este modelo foi desenvolvido procurando-se sempre uma solução de compromisso entre a precisão dos resultados e a simplicidade dos cálculos.

4.4.1 HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES ASSUMIDAS

Este modelo matemático baseia-se em uma série de hipóteses e simplificações assumidas para a viabilização dos cálculos. As principais hipóteses e simplificações são agora colocadas abaixo.

1. O escoamento é incompressível e se dá em regime permanente.
2. Existe uma simetria axial no escoamento.
3. O fluido que escoar entre os discos é newtoniano (o que não ocorre na verdade com o sangue).
4. O fluido é continuamente admitido entre os discos através da secção de entrada ou sucção (superfície cilíndrica do

raio $\underline{r_a}$), com uma velocidade puramente radial satisfazendo à equação da continuidade na forma integral (veja item 4.4.2) e com uma pressão igual a $\underline{p_s}$. O fluido preenche completamente o espaço entre os discos, sendo descarregado através da secção de saída ou descarga com uma pressão igual a $\underline{p_d}$.

5. O modelo será desenvolvido sem prever o aparecimento de qualquer escoamento reverso radial (veja item 4.3).

6. Será feito um tratamento diferencial somente com relação à dimensão radial ($\underline{r}$), sendo as variáveis $\underline{m}$, $\underline{v}$ e $\underline{p}$ tomadas como valores médios ao longo da espessura $\underline{b}$. A componente $\underline{w}$ da velocidade e as derivadas em relação à dimensão axial ($\underline{z}$) não aparecerão nos cálculos, devido às simplificações assumidas.

7. Outras hipóteses ou simplificações que se fizerem necessárias serão esclarecidas durante o decorrer das demonstrações.

4.4.2 DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES BÁSICAS

Vamos agora obter as equações básicas que, segundo o nosso modelo, regem o escoamento do fluido entre os discos. Serão escritas inicialmente 2 equações de movimento (para as direcções radial e tangencial) e uma equação de continuidade; a seguir, serão feitas manipulações com uma equação de energia para o cálculo do rendimento teórico da bomba.

As equações do movimento, que representam uma aplicação da 2a. Lei de Newton ao escoamento, serão aqui deduzidas a partir de uma adaptação das equações de N-S (1) ao presente caso. Olhando para estas equações, e tendo em vista as hipóteses simplificadoras explicitadas anteriormente, os termos das acelerações a serem considerados em ambas as direcções são (já com derivadas totais)

$$\text{direcção } \underline{r} \rightarrow m \frac{du}{dr} - \frac{v^2}{r}$$

$$\text{direcção } \underline{\theta} \rightarrow m \frac{dv}{dr} + \frac{mv}{r}$$

Imaginemos agora um elemento fluido infinitesimal de massa $\rho b r d\theta dr$ (representado na Fig. 12), cujas fronteiras anterior e posterior coincidem com os próprios discos. As forças atuantes sobre este elemento a serem consideradas pelo modelo são:

1. Forças devido ao gradiente de pressão. Lembrando-nos das equações (1) e das hipóteses simplificadoras feitas, o único termo das forças de pressão a ser considerado tem a seguinte expressão

$$\text{direção } r \rightarrow -\frac{dp}{dr} b r d\theta dr$$

2. Forças de atrito entre os discos e o elemento fluido. Estas forças de atrito são devidas às tensões de cisalhamento aparentes [32] aí existentes, as quais incluem efeitos de viscosidade e de turbulência (viscosidade turbilhonar). As forças de cisalhamento atuantes nas outras superfícies do elemento são desprezadas, por serem consideradas de menor importância. Vale ressaltarmos que as tensões de cisalhamento serão tratadas neste texto como sendo grandezas vetoriais, sem prejuízo da precisão do modelo desenvolvido.

Obs.: São desprezadas pelo modelo possíveis forças de campo atuantes (como a gravidade), por serem consideradas também de menor importância.

Para a determinação das expressões das forças de atrito tratadas acima, vamos assumir neste modelo que cada tensão de cisalhamento ($\vec{\tau}_1$ ou $\vec{\tau}_2$) existente entre o elemento fluido e o respectivo disco (1 ou 2) possua a mesma direção e o sentido oposto aos da velocidade de escoamento do fluido em relação ao mesmo disco. Tais direções e sentidos encontram-se exemplificados na Fig. 13, para uma dada posição radial.

Sejam $\vec{a}_r$ e $\vec{a}_\theta$ os versores representativos das direções radial e tangencial, respectivamente, vamos escrever inicialmente as expressões vetoriais das velocidades de escoamento do fluido relativas a cada disco

$$\vec{V}_{REL1} = u \vec{a}_r + (v - \Omega r) \vec{a}_\theta \quad (3)$$

$$\vec{V}_{REL2} = u \vec{a}_r + v \vec{a}_\theta$$

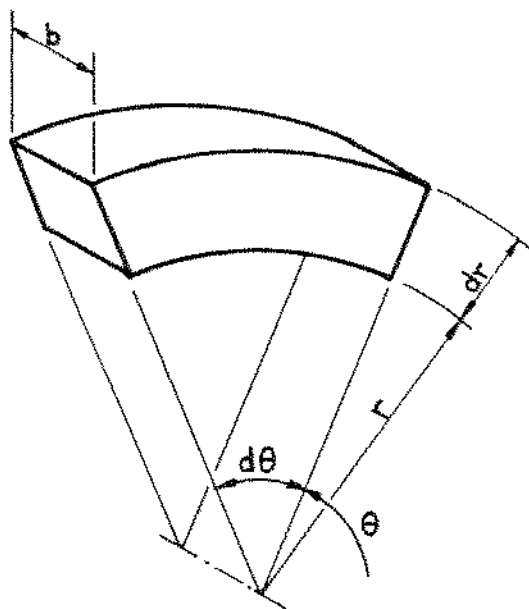


Fig.12 Elemento fluido infinitesimal.

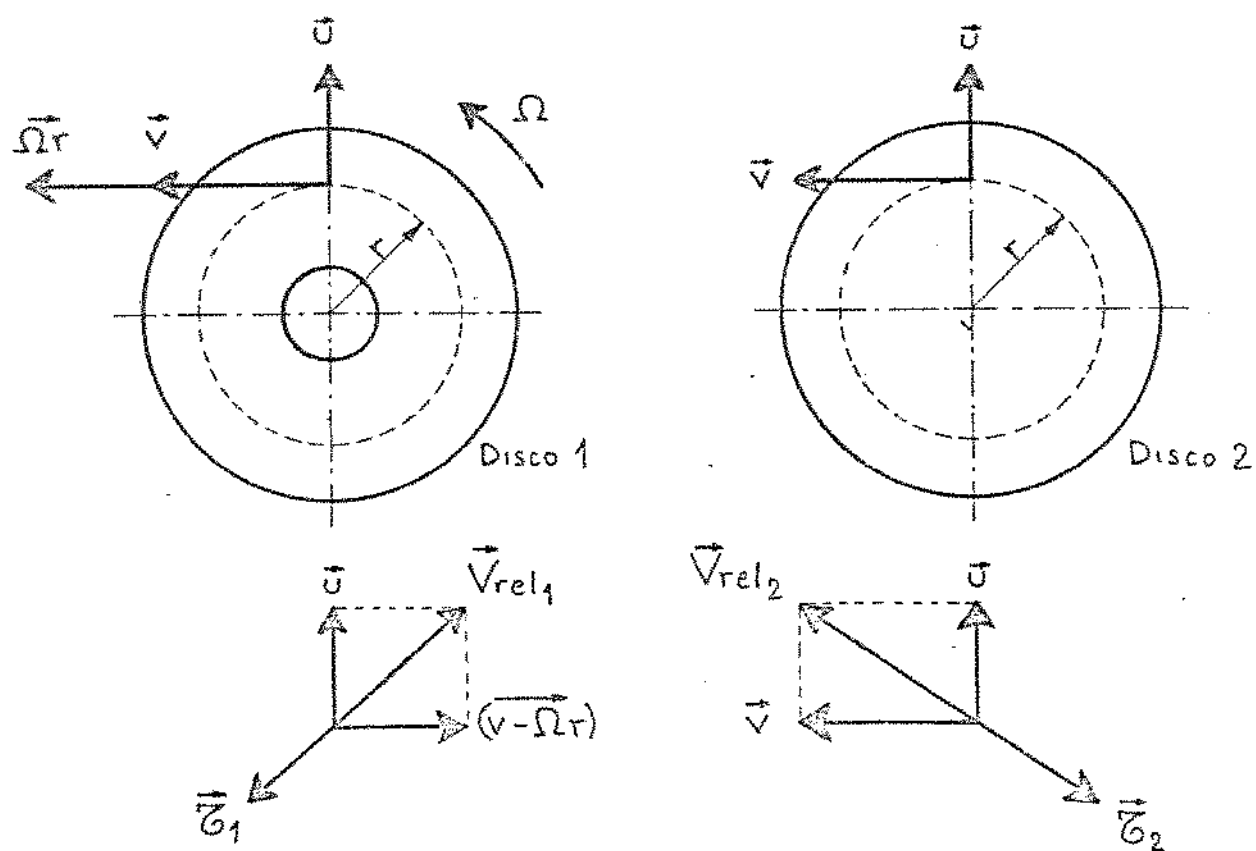


Fig.13 Direções e sentidos das tensões de cisalhamento nos discos.

Os módulos dessas velocidades relativas podem então ser facilmente calculados

48

$$V_{REL1} = [u^2 + (v - \Omega r)^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$V_{REL2} = (u^2 + v^2)^{1/2}$$

Assim, torna-se possível calcularmos os módulos das projeções radiais e tangenciais das tensões de cisalhamento (τ_{1r} e $\tau_{1\theta}$)

$$\tau_{1r} = \tau_1 \frac{u}{V_{REL1}} \quad , \quad \tau_{1\theta} = \tau_1 \frac{(\Omega r - v)}{V_{REL1}} \quad (5)$$

$$\tau_{2r} = \tau_2 \frac{u}{V_{REL2}} \quad , \quad \tau_{2\theta} = \tau_2 \frac{v}{V_{REL2}}$$

Portanto, a segunda Lei de Newton aplicada ao elemento fluido de massa $\rho b r d\theta dr$, para as direções r e θ , fornece

$$\text{dir. } r \rightarrow \rho b r d\theta dr \left(u \frac{du}{dr} - \frac{v^2}{r} \right) = - \frac{dp}{dr} b r d\theta dr - (\tau_{1r} + \tau_{2r}) r d\theta dr$$

$$\text{dir. } \theta \rightarrow \rho b r d\theta dr \left(u \frac{dv}{dr} + \frac{uv}{r} \right) = (\tau_{1\theta} - \tau_{2\theta}) r d\theta dr$$

Simplificando

$$\text{dir. } r \rightarrow u \frac{du}{dr} - \frac{v^2}{r} = - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} - \frac{\tau_{1r} + \tau_{2r}}{\rho b} \quad (6)$$

$$\text{dir. } \theta \rightarrow u \frac{dv}{dr} + \frac{uv}{r} = \frac{\tau_{1\theta} - \tau_{2\theta}}{\rho b} \quad (7)$$

Para interpretarmos fisicamente como o modelo prevê a variação da pressão em função do raio, vamos reescrever a eq. (6) sob a seguinte forma

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} = \frac{v^2}{r} - u \frac{du}{dr} - \frac{\tau_{1r} + \tau_{2r}}{\rho b}$$

No lado direito da igualdade acima, temos três termos que afetam a distribuição radial da pressão:

1. O primeiro termo representa a aceleração centrífuga, tendendo a incrementar a pressão com o aumento do raio.

2. O segundo termo representa a aceleração convectiva, tendendo a incrementar a pressão com o aumento do raio (veremos que o sinal da derivada envolvida é negativo).

3. O terceiro termo traduz uma resistência ao escoamento na direcção radial, contrapondo-se ao efeito dos outros dois termos.

Este modelo se vale também da equação da continuidade escrita sob uma forma integral para a direcção radial, dizendo que a vazão (Q) do fluido através da bomba é invariável com o raio

$$Q = 2\pi r b u \quad (8)$$

Um dos objetivos desta análise matemática é a determinação teórica do rendimento da bomba. Para realizarmos este objetivo, vamos dividir a potência total (P_R) fornecida ao rotor (disco 1) da bomba por algum agente externo em duas parcelas, sendo uma parcela a potência útil ganha pelo fluido (P_U) e a outra a potência dissipada sob a forma de perdas viscosas (P_F)

$$P_R = P_U + P_F \quad (9)$$

Para deduzirmos uma expressão para as perdas ocorridas no escoamento entre os discos, um dos caminhos possíveis é o emprego de uma equação de energia. Lançaremos mão aqui de uma equação escrita na forma diferencial, já desprezados efeitos de gravidade. Esta equação é válida ao longo de uma linha de corrente, e difere da conhecida equação de Euler apenas pelo termo do trabalho útil (dW_m) [32]

$$\frac{dp}{\rho} + V_{ABS} dV_{ABS} = dW_m$$

onde V_{ABS} é a velocidade absoluta do fluido (que coincide com V_{REL2}) e W_m representa o trabalho útil fornecido ao fluido por unidade de massa. É possível provarmos (Anexo E) que tal equação pode ser transformada na seguinte expressão, escrita para a direcção radial

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} + u \frac{du}{dr} + v \frac{dv}{dr} = \frac{dW_m}{dr} \quad (10)$$

A substituição da equação (6) na equação (10) fornece, já simplificando e rearranjando os termos

$$v \left(\frac{dv}{dr} + \frac{v}{r} \right) - \frac{\zeta_{1r} + \zeta_{2r}}{\rho_b} = \frac{dw_m}{dr}$$

Com o auxílio da equação (7), podemos escrever

$$\frac{v}{m} \frac{\zeta_{1\theta} - \zeta_{2\theta}}{\rho_b} - \frac{\zeta_{1r} + \zeta_{2r}}{\rho_b} = \frac{dw_m}{dr} \quad (11)$$

A potência útil se relaciona com o trabalho útil por unidade de massa da seguinte forma

$$P_u = \rho Q w_m \quad (12)$$

Tomando a derivada da eq. (12) em relação a r , e com o auxílio das equações (8) e (11), resulta

$$2\pi r [\nu(\zeta_{1\theta} - \zeta_{2\theta}) - m(\zeta_{1r} + \zeta_{2r})] dr = dP_u \quad (13)$$

Tomando agora um elemento de largura dr , representado na Fig. 14 sobre o disco girante, podemos calcular o valor de um incremento infinitesimal da potência total fornecida pelo rotor ao fluido (potência do rotor)

$$dP_R = \zeta_{1\theta} 2\pi r dr \Omega r \quad (14)$$

A combinação das equações (9), (13) e (14) fornece, já arranjados os termos

$$dP_F = 2\pi r [\zeta_{1\theta}(\Omega r - v) + \zeta_{2\theta}v + \zeta_{1r}m + \zeta_{2r}m] dr \quad (15)$$

A interpretação física da equação (15) diz que a perda total ocorrida no escoamento pode ser dividida em quatro parcelas

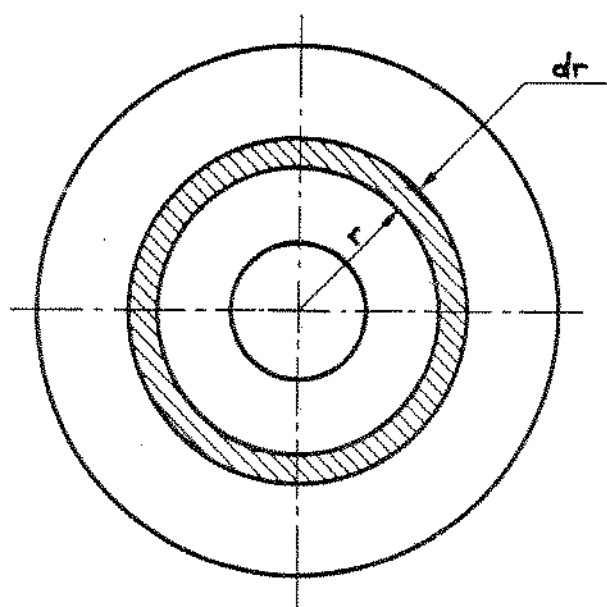


Fig.14 Elemento tomado sobre o disco 1.

distintas, sendo uma tangencial e a outra radial para cada um dos discos da bomba.

4.4.3 TENSÕES DE CISALHAMENTO NOS DISCOS

Já foi comentada anteriormente (item 4.3) a dificuldade de se obter uma solução exata para o cálculo do escoamento tridimensional existente no interior da bomba de discos em questão. Através de algumas hipóteses simplificadoras feitas no item 4.4.1, as equações de Navier-Stokes (1) foram assim reduzidas a um conjunto de 2 equações (6) e (7) escritas para um espaço bidimensional ($\underline{r}$ e $\underline{\theta}$); adicionando-se uma equação de continuidade (8) a estas duas equações, obtivemos portanto um sistema de 3 equações a 3 incógnitas ($\underline{u}$, $\underline{v}$, $\underline{p}$). Escrevemos também outras equações auxiliares. Para a resolução de tal sistema, resta-nos agora encontrarmos expressões para o cálculo das tensões de cisalhamento junto aos discos.

- As expressões das tensões de cisalhamento junto aos discos serão por nós deduzidas de maneira aproximada, através de mais algumas hipóteses simplificadoras. Apenas para o cálculo dessas tensões, consideraremos o problema (já estabelecido) do escoamento bidimensional no plano ($\underline{r}$, $\underline{\theta}$) como sendo uma composição de 2 escoamentos unidimensionais, sendo um na direção $\underline{r}$ e o outro na direção $\underline{\theta}$.

4.4.3.1 MÉTODO PARA CONDUTOS RETANGULARES

Para o cálculo das tensões de cisalhamento nos discos, vamos nos valer da teoria da perda de carga distribuída em condutos forçados e canais [32]. De acordo com esta teoria, o módulo da tensão de cisalhamento ($\underline{\tau}$) junto à parede de um conduto forçado pode ser relacionado à densidade do fluido ($\underline{\rho}$) e ao quadrado da velocidade média do escoamento deste fluido ($\underline{V}$), através de um coeficiente de atrito ($\underline{f}$)

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho V^2 \quad (16)$$

é interessante observarmos que este coeficiente de atrito (f) pode ser considerado como um adimensional que relaciona uma força de atrito com uma força de inércia do fluido.

Esta teoria foi inicialmente desenvolvida para escoamentos em condutos cilíndricos. Entretanto, esta pode ser facilmente estendida com razoável precisão ao caso de escoamentos em condutos ou canais de secções não circulares, trabalhando-se com a tensão de cisalhamento média na parede; para o cálculo do coeficiente de atrito, emprega-se então o conceito de diâmetro hidráulico (D_H).

A definição de diâmetro hidráulico envolve uma outra grandeza, convencionalmente chamada de perímetro molhado (P). Por definição, a porção do perímetro do conduto em que a parede está em contato com o fluido é chamada de perímetro molhado. Sendo S a área da secção transversal do escoamento, temos o diâmetro hidráulico como

$$D_H = 4 \frac{S}{P} \quad (17)$$

O número de Reynolds (Re), que é um número adimensional característico de cada escoamento, escreve-se da seguinte forma

$$Re = \frac{\rho V D_H}{\mu} \quad (18)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

O valor do coeficiente de atrito (f) costuma ser obtido através do diagrama de Moody [32] ou, alternativamente, através de equações empíricas; isto é feito a partir dos valores do número de Reynolds e da rugosidade relativa da parede do conduto (ϵ/D_H), sendo ϵ a medida de sua rugosidade absoluta.

Utilizaremos neste trabalho a equação empírica que foi apresentada por Churchill [45] em 1977, a qual é bastante precisa para qualquer regime de escoamento (laminar, transição ou turbulento) e se mostra adequada para uma programação em computador

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (19)$$

onde

$$A = \left[2,457 \ln \frac{1}{(7/Re)^{0,9} + 0,27 \epsilon/D_H} \right]^{16}$$

$$B = \left(\frac{37.530}{Re} \right)^{16}$$

Para valores do número de Reynolds menores do que 2.000 (regime laminar), pode ser usada como alternativa uma equação consideravelmente mais simples

$$f = \frac{64}{Re} \quad (20)$$

Jones Jr. [46] reuniu e apresentou em 1976 uma série de dados experimentais demonstrando que, no cálculo do coeficiente de atrito para escoamentos em condutos lisos de geometria retangular, o emprego um número de Reynolds modificado (Re^*) por um fator aqui chamado de R leva a uma maior precisão dos resultados; este fator considera que, em condutos retangulares, as perdas de carga distribuídas não são exatamente iguais àsquelas encontradas em condutos circulares de iguais diâmetros hidráulicos, devido ao aparecimento de

escoamentos secundários. Sendo s a altura do conduto retangular e w a sua largura, o fator k pode ser calculado aproximadamente através da seguinte expressão

$$k = \frac{2}{3} + \frac{11}{24} \frac{s}{w} \left(2 - \frac{s}{w} \right) \quad (21)$$

Esta equação, que Jones Jr. demonstrou empiricamente ser bastante precisa para condutos lisos, será por nós extrapolada para o caso de condutos rugosos. Finalmente, o número de Reynolds modificado a ser utilizado no emprego das equações (19) e (20) vale

$$Re^* = k Re \quad (22)$$

4.4.3.2 ESCOAMENTO ENTRE DUAS PLACAS ESTACIONÁRIAS

Analisaremos agora um caso ideal de escoamento que será posteriormente comparado ao escoamento radial do fluido através da bomba de discos. Trata-se do escoamento em regime permanente de um fluido incompressível, viscoso e newtoniano, que se movimenta entre duas placas infinitas, estacionárias e dispostas paralelamente entre si, na ausência de forças de campo (Fig. 15).

Supondo que a velocidade média de escoamento do fluido seja V e que o espaçamento entre as placas seja b , vamos aplicar a teoria apresentada no item 4.4.3.1 a esta situação, para o cálculo da tensão média de cisalhamento junto às placas.

A determinação do diâmetro hidráulico deste conduto é feita imaginando-se, por exemplo, um pedaço deste com largura unitária e comprimento infinito. A aplicação da equação (17) fornece então

$$D_H = 4 \frac{b \cdot 1}{(1+1)} = 2b$$

Sendo as placas infinitas, a equação (21) resulta em

$$k = \frac{2}{3} \quad , \quad \text{pois} \quad \frac{s}{w} \rightarrow 0$$

A tensão média de cisalhamento (τ) se traduz neste caso pela média entre as tensões de cisalhamento junto às duas placas (τ' e τ'')

$$\tau = \frac{1}{2} (\tau' + \tau'')$$

Conhecidas ainda a rugosidade média das placas e as características físicas do fluido, estão assim disponíveis todos os dados necessários para o cálculo de τ a partir da eq. (16).

4.4.3.3 ESCOAMENTO ENTRE DUAS PLACAS - UMA EM TRANSLAÇÃO

O problema analisado no item 4.4.3.2 será agora modificado para o caso em que uma das placas possui uma velocidade constante de translação (U) no mesmo sentido do escoamento, enquanto a outra permanece estacionária (Fig. 16). Este escoamento ideal será posteriormente comparado ao escoamento tangencial do fluido através da bomba de discos.

Nesta situação, a teoria desenvolvida no item 4.4.3.1 para o cálculo da tensão de cisalhamento precisará sofrer adaptações, pois temos um conduto em que suas paredes não possuem a mesma velocidade. Um caso particular deste escoamento é analisado teoricamente e de maneira exata no Anexo E, onde chegamos ao seguinte resultado para uma condição de escoamento laminar e unidirecional entre as placas

$$\tau' - \tau'' = \frac{12\mu}{b} \left(\frac{U}{2} - \bar{u} \right)$$

Sendo τ' e τ'' os módulos das tensões de cisalhamento junto às placas móvel e estacionária, respectivamente, e $\bar{u}$ a velocidade média absoluta de escoamento do fluido entre estas.

Esta equação pode também ser escrita sob a forma

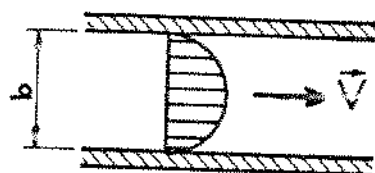


Fig.15 Escoamento entre duas placas estacionárias.

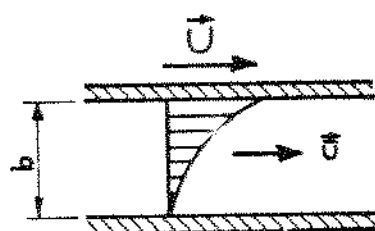


Fig.16 Escoamento entre duas placas - uma em translação.

$$\frac{1}{2} (\tau' - \tau'') = \frac{1}{8} f \rho V^2 \quad (23)$$

onde

$$f = \frac{96\mu}{\rho V D_H} ; V = \frac{U}{2} - \bar{u} ; D_H = 2b$$

A interpretação física deste resultado pode ser feita por analogia à eq. (16), da seguinte forma:

1. O termo da tensão média de cisalhamento é calculado como sendo igual à média entre as tensões de cisalhamento nas placas móvel e estacionária, sendo que τ'' carrega um sinal negativo por ter sido oposto ao de τ' .

2. O cálculo do coeficiente de atrito decorre da aplicação da equação (20), com um número de Reynolds modificado por um fator k igual a 2/3 (placas infinitas)

$$f = \frac{96\mu}{\rho V D_H} = \frac{64}{Re^*}$$

3. A velocidade V representa o módulo da média entre as velocidades de escoamento do fluido relativas a cada uma das placas, também com os respectivos sinais

$$V = \frac{U}{2} - \bar{u} = \frac{1}{2} [(U - \bar{u}) - \bar{u}]$$

4. O diâmetro hidráulico é calculado como no item 4.4.3.2.

Vamos assumir neste modelo que a eq. (23) possa ser estendida para qualquer regime de escoamento, desde que o cálculo do coeficiente de atrito f seja efetuado convenientemente através da eq. (19).

Da mesma forma que os resultados deste item foram deduzidos através de uma análise matemática exata válida para um escoamento em regime laminar, sendo posteriormente estendidos para quaisquer regimes de escoamento, o mesmo

caminho poderia ter sido tomado para a obtenção dos resultados obtidos no item 4.4.3.2.

4.4.3.4 CÁLCULO DAS TENSÕES NOS DISCOS

A principal hipótese simplificadora a ser feita agora, apenas para efeito do cálculo aproximado das tensões de cisalhamento junto aos 2 discos da bomba em questão, será a composição dos escoamentos unidimensionais tratados nos itens 4.4.3.2 e 4.4.3.3 para o modelamento matemático do escoamento bidimensional estabelecido no plano $(\underline{r}, \underline{\theta})$ desta bomba.

O escoamento radial entre os dois discos finitos da bomba será por nós identificado com o escoamento existente entre duas placas infinitas, paralelas entre si e estacionárias (item 4.4.3.2), enquanto que o escoamento tangencial entre os mesmos discos será identificado com o escoamento existente entre duas placas paralelas entre si e infinitas, estando uma estacionária e a outra se movimentando com uma velocidade constante de translação no mesmo sentido do escoamento (item 4.4.3.3); o valor desta velocidade de translação será identificado com o próprio valor da velocidade tangencial do disco rotativo, variável em função do raio

$$U = \Omega r$$

Vamos inicialmente reescrever a eq. (16) sob uma forma vetorial, onde fica implícita uma nova hipótese (a ser discutida mais adiante) dizendo que os "vetores" $\underline{\vec{e}}$ e $\underline{\vec{V}}$ possuem direcções coincidentes (e sentidos opostos)

$$\underline{\vec{e}} = -\frac{1}{8} \int \rho V \underline{\vec{V}} \quad (24)$$

Os "vetores" $\underline{\vec{e}}$ e $\underline{\vec{V}}$ serão expressos agora através de suas componentes radiais e tangenciais, por analogia aos itens 4.4.3.2 e 4.4.3.3

$$\vec{\tau} = -\frac{1}{2} (\tau_{1r} + \tau_{2r}) \vec{r} + \frac{1}{2} (\tau_{1\theta} - \tau_{2\theta}) \vec{\lambda}_\theta \quad (25)$$

$$\vec{V} = \mu \vec{\lambda}_r + \left(v - \frac{\Omega r}{2} \right) \vec{\lambda}_\theta \quad (26)$$

A partir da eq. (26), temos imediatamente o módulo de $\vec{V}$

$$V = \left[\mu^2 + \left(v - \frac{\Omega r}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (27)$$

Está implícita na aplicação da eq. (24) a hipótese de que os vetores $\vec{\tau}$ e $\vec{V}$ devam compartilhar da mesma direção. Vamos investigar agora a tradução matemática desta hipótese, com o auxílio da Fig. 17 (lembrando que, de acordo com as hipóteses do item 4.4.2, $\vec{\tau}_1$ possui a mesma direção de $\vec{V}_{REL1}$ e $\vec{\tau}_2$ a mesma direção de $\vec{V}_{REL2}$).

Por semelhança de triângulos, é possível escrevermos a seguinte expressão em termos dos módulos dos vetores envolvidos

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{V_{REL1}}{V_{REL2}} \quad (28)$$

Fisicamente, a eq. (28) diz que uma das condições de validade do nosso modelo matemático é que, no caso real, a relação existente entre os módulos das tensões de cisalhamento resultantes nos discos seja aproximadamente igual à relação existente entre os módulos das velocidades de escoamento do fluido em relação a estes mesmos discos.

Ainda com o auxílio da Fig. 17, é possível escrevermos por semelhança de triângulos

$$\tau_1 = \tau \frac{V_{REL1}}{V} \quad ; \quad \tau_2 = \tau \frac{V_{REL2}}{V} \quad (29)$$

Tomando agora projeções nas direções radial e tangencial, vale também escrevermos (em módulo), lembrando das equações (25) e (26)

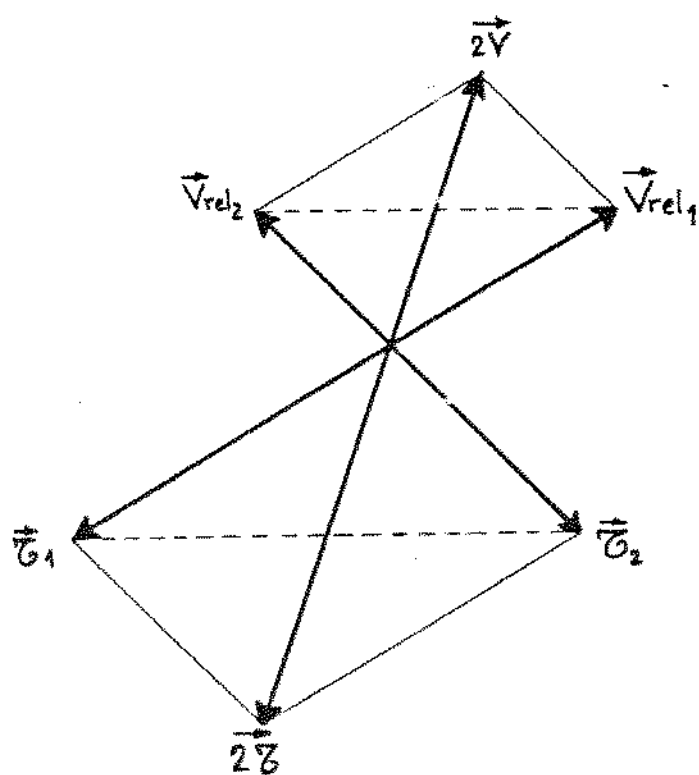


Fig.17 Componentes dos "vetores" $\vec{C}$ e $\vec{V}$.

$$\frac{1}{2} (\zeta_{1r} + \zeta_{2r}) = \zeta \frac{\mu}{V} \quad (30)$$

$$\frac{1}{2} (\zeta_{1\theta} - \zeta_{2\theta}) = \zeta \frac{(\frac{\Omega r}{2} - v)}{V}$$

4.4.4 ROTEIRO PARA O USO DO MODELO MATEMÁTICO

Vamos agora definir claramente a metodologia pela qual as equações deduzidas nos itens anteriores deverão ser utilizadas visando a obtenção dos resultados teóricos esperados, ou seja, visando a previsão matemática do desempenho da bomba em função de uma série de dados de entrada do modelo.

Inicialmente, vamos listar os parâmetros que definem fisicamente as características do sistema a ser analisado e as suas condições de operação, os quais servem de dados de entrada para o modelo matemático:

1. Características geométricas - r_c , r_e , b , ϵ
2. Características do fluido - ρ , γ
3. Condições de operação - Ω , Q , p_s

A aplicação da eq. (8) permite diretamente o cálculo da componente radial (μ) da velocidade absoluta do fluido para cada raio. A seguir, a resolução simultânea das equações (7), (16), (18) e (22) com $D_H = 2b$ e $k = 2/3$, (19) ou (20), (27) e (30) fornece os valores da componente tangencial (v) da velocidade do fluido e do número de Reynolds (Re^*) em função do raio, além de diversas outras variáveis auxiliares.

A eq. (6) pode agora ser facilmente integrada para o cálculo da variação da pressão através da bomba

$$\Delta p = p_d - p_s$$

Os valores da tensão de cisalhamento resultante em cada disco ($\underline{\tau_1}$ e $\underline{\tau_2}$) podem ser obtidos por intermédio da eq. (29).

A potência total fornecida pelo rotor ao fluido ($\underline{P_R}$) pode ser calculada através da integração da eq. (14), que equivale ao torque aplicado ao rotor multiplicado pela sua velocidade angular.

A potência útil ganha pelo fluido ($\underline{P_U}$) pode ser calculada por dois caminhos diferentes, ambos os cálculos podendo ser realizados a título de verificação:

1. O primeiro caminho implica na aplicação imediata da equação da energia escrita na forma integral [32], entre a sucção e a descarga da bomba.

$$\underline{P_U} = Q \left[(\underline{p_d} - \underline{p_s}) + \frac{\rho}{2} (\underline{V_{ABS_d}}^2 - \underline{V_{ABS_s}}^2) \right] \quad (31)$$

2. O segundo caminho implica na integração da (13).

O cálculo do rendimento ($\underline{\eta}$) da bomba torna-se agora imediato

$$\underline{\eta} = \frac{\underline{P_U}}{\underline{P_R}} \quad (32)$$

Ainda é possível calcularmos a altura manométrica ($\underline{H_m}$) da bomba, através da seguinte expressão

$$\underline{H_m} = \frac{\underline{P_U}}{\rho g Q} \quad (33)$$

onde $\underline{g}$ é a aceleração da gravidade e $\underline{H_m}$ sai em unidades de altura do líquido bombeado.

O Anexo E apresenta o desenvolvimento do programa computacional MODELO MATEMÁTICO destinado a resolver o conjunto de equações descrito acima, para a realização de simulações numéricas em microcomputador. Os resultados obtidos com tal programa serão apresentados no Capítulo 5.

II - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Foram apresentados detalhadamente nos capítulos anteriores os métodos experimentais e teóricos utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho. Descreveremos neste capítulo os resultados obtidos com tais procedimentos, e faremos uma análise crítica destes.

Serão mostrados primeiramente os resultados experimentais obtidos através de ensaios realizados na bancada de teste construída, os quais serão mostrados sob a forma de curvas características do protótipo PT-01-A.

Descreveremos posteriormente os resultados teóricos obtidos com a aplicação do programa de computador MODELO MATEMÁTICO a um sistema de discos similar ao protótipo PT-01-A, visando o cálculo teórico do escoamento existente neste.

Uma comparação entre os resultados experimentais e os resultados teóricos obtidos e uma análise crítica destes resultados serão feitas no item 5.4.

Vale lembrarmos que os desenvolvimentos experimental e teórico foram realizados de maneira absolutamente independente entre si, tornando assim totalmente válida uma avaliação da precisão do modelo matemático através da comparação entre os seus resultados e os resultados experimentais obtidos.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As curvas características de uma bomba centrífuga são normalmente determinadas pelas variações das seguintes grandezas em função da vazão: altura manométrica, potência fornecida pelo motor à bomba e rendimento da bomba. A bancada de teste que construímos no IDPC permitiu-nos apenas o levantamento da curva de altura manométrica em função da vazão, ficando como uma sugestão para o futuro a inclusão na

bancada de outros instrumentos que permitam a determinação experimental da potência e, conseqüentemente, também do rendimento.

Os ensaios do protótipo PT-01-A resultaram no gráfico da Fig. 18, que apresenta as curvas experimentais de altura manométrica (H_m) obtidas em função da vazão (Q), para cinco valores diferentes de rotações por minuto (n) do rotor. O motor elétrico utilizado restringiu a abrangência dos ensaios a uma velocidade máxima do rotor equivalente a 2000 rpm, impossibilitando o alcance de velocidades maiores. Os pontos marcados no gráfico foram medidos experimentalmente, e as retas indicadas representam ajustes das curvas realizados pelo método dos mínimos quadrados (regressão linear). Para cada um dos cinco valores de velocidade indicados, a máxima vazão conseguida foi obtida com a abertura máxima das válvulas da bancada de teste, mantendo-se a pressão de sucção dentro da faixa desejada.

Observando este gráfico, notamos que os pontos experimentais apresentam uma dispersão relativamente pequena em relação às retas ajustadas (o coeficiente de correlação situou-se entre -1,0 e -0,992), o que se traduz matematicamente por um decaimento aproximadamente linear da altura manométrica com o aumento da vazão. É de se esperar também que, para valores maiores de velocidade do rotor, este protótipo seja capaz de fornecer pressões altas o suficiente de forma a se situarem dentro das faixas necessárias para a realização de perfusões em humanos com valores fisiológicos normais de vazão. É possível notarmos ainda neste gráfico que as curvas de pressão manométrica não sofrem um decaimento muito acentuado com o incremento da vazão, tendendo assim a aproximar-se das curvas de uma bomba de pressão constante. Este é um comportamento desejável numa bomba centrífuga de sangue, uma vez que, nestas condições, alterações nos valores de resistências vasculares do paciente levariam a uma variação do fluxo sem a existência de uma conseqüente variação significativa na sua pressão arterial [48].

Fizemos ainda um estudo experimental medindo os efeitos das variações geométricas da bomba apresentadas no item 3.2 sobre o comportamento de suas curvas características, para dois valores diferentes de velocidade do rotor. O gráfico da

Fig. 19 apresenta curvas experimentais de altura manométrica para as configurações PT-01-A e PT-01-B (Anexo C), mostrando comparativamente o efeito da diminuição do espaçamento entre o rotor e a base da bomba.

Podemos notar na Fig. 19 um deslocamento para baixo da curva de altura manométrica quando ocorre uma diminuição no espaçamento entre o rotor e a base da bomba, o que nos leva a concluir que, além do escoamento principal na parte curva da bomba, o escoamento na parte inferior desta também tem influência sobre o seu desempenho fluidodinâmico. A configuração do protótipo PT-01-A resulta num desempenho melhor em termos de pressão de bombeamento.

O gráfico da Fig.20 apresenta curvas experimentais de altura manométrica para as configurações PT-01-A, C, D, E e F, mostrando comparativamente o efeito da variação do espaçamento entre o rotor e a tampa da bomba.

Este gráfico mostra que, para as condições ensaiadas, um aumento no espaçamento entre o rotor e a tampa da bomba resulta num deslocamento para cima da curva de altura manométrica, valendo também a afirmação *recíproca*. Isto se traduz fisicamente num desempenho inferior em termos de pressão de bombeamento para uma condição de tampa e rotor muito próximos, o que poderia ser explicado por um aumento exagerado nas perdas por atrito viscoso. Por outro lado, notamos que as curvas dos protótipos PT-01-C e PT-01-D estão muito próximas, significando que há um valor ótimo de espaçamento entre a tampa e o rotor da bomba a partir do qual um aumento neste espaçamento não acarretará mais benefícios significativos à bomba, devendo inclusive prejudicar o seu desempenho.

5.3 RESULTADOS TEÓRICOS

Independentemente dos ensaios experimentais realizados, procuramos levantar teoricamente as curvas características do protótipo PT-01-A através da utilização do programa de computador MODELO MATEMÁTICO. Isto foi feito de forma aproximada através de uma idealização deste protótipo,

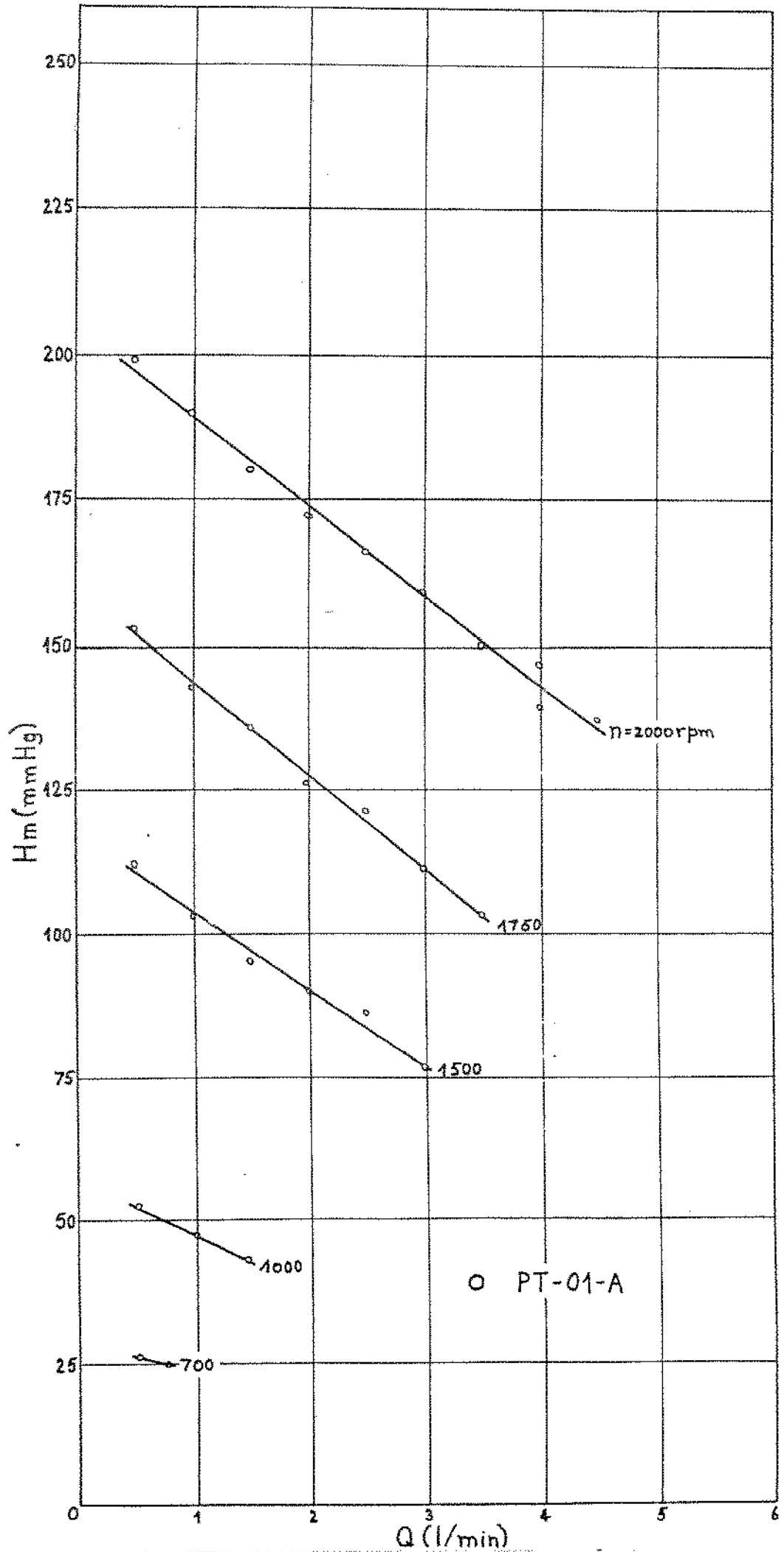


Fig.18 Resultados experimentais obtidos com o protótipo PT-01-A.

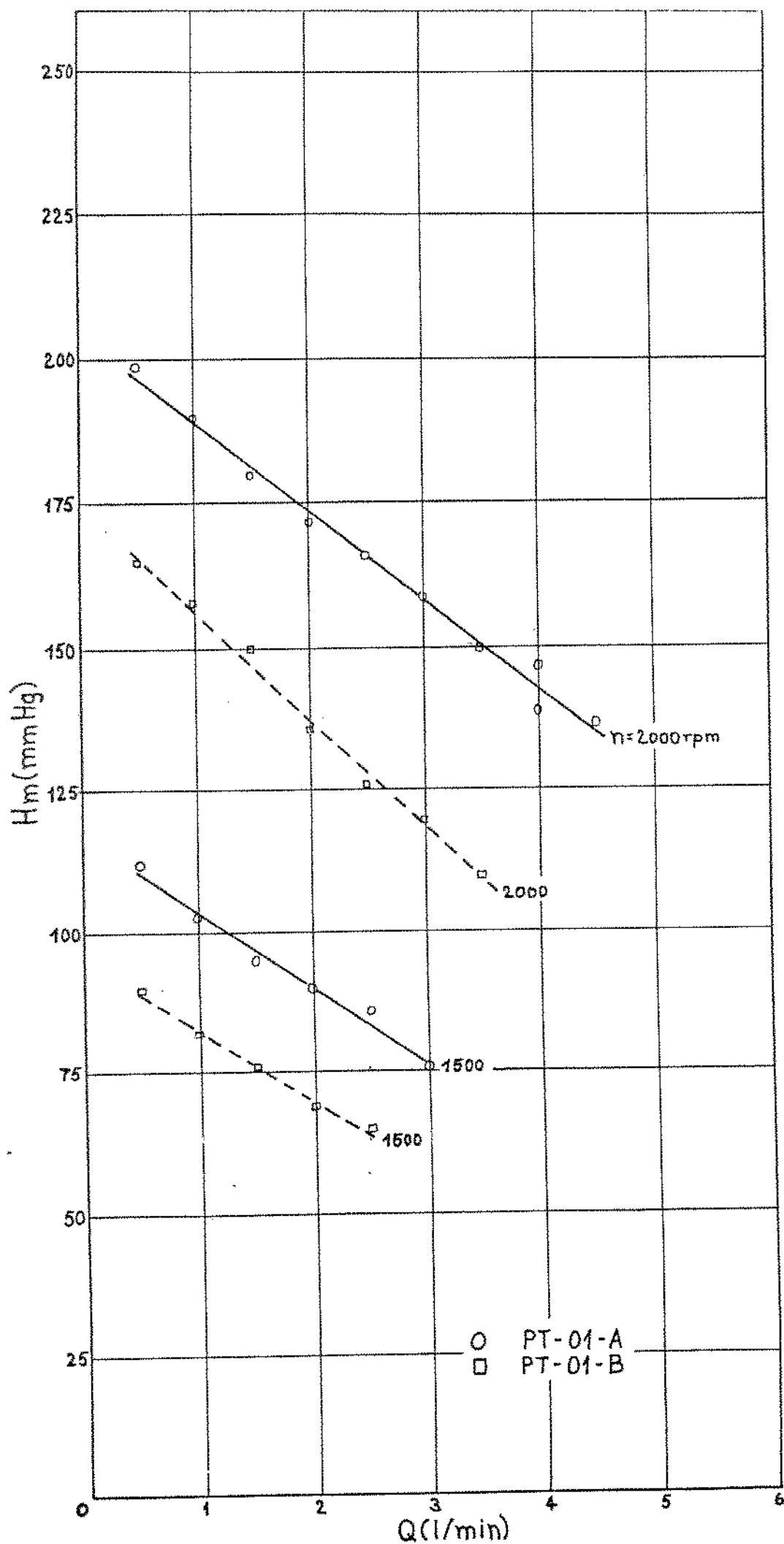


Fig.19 Resultados experimentais comparativos entre os protótipos PT-01-A e B.

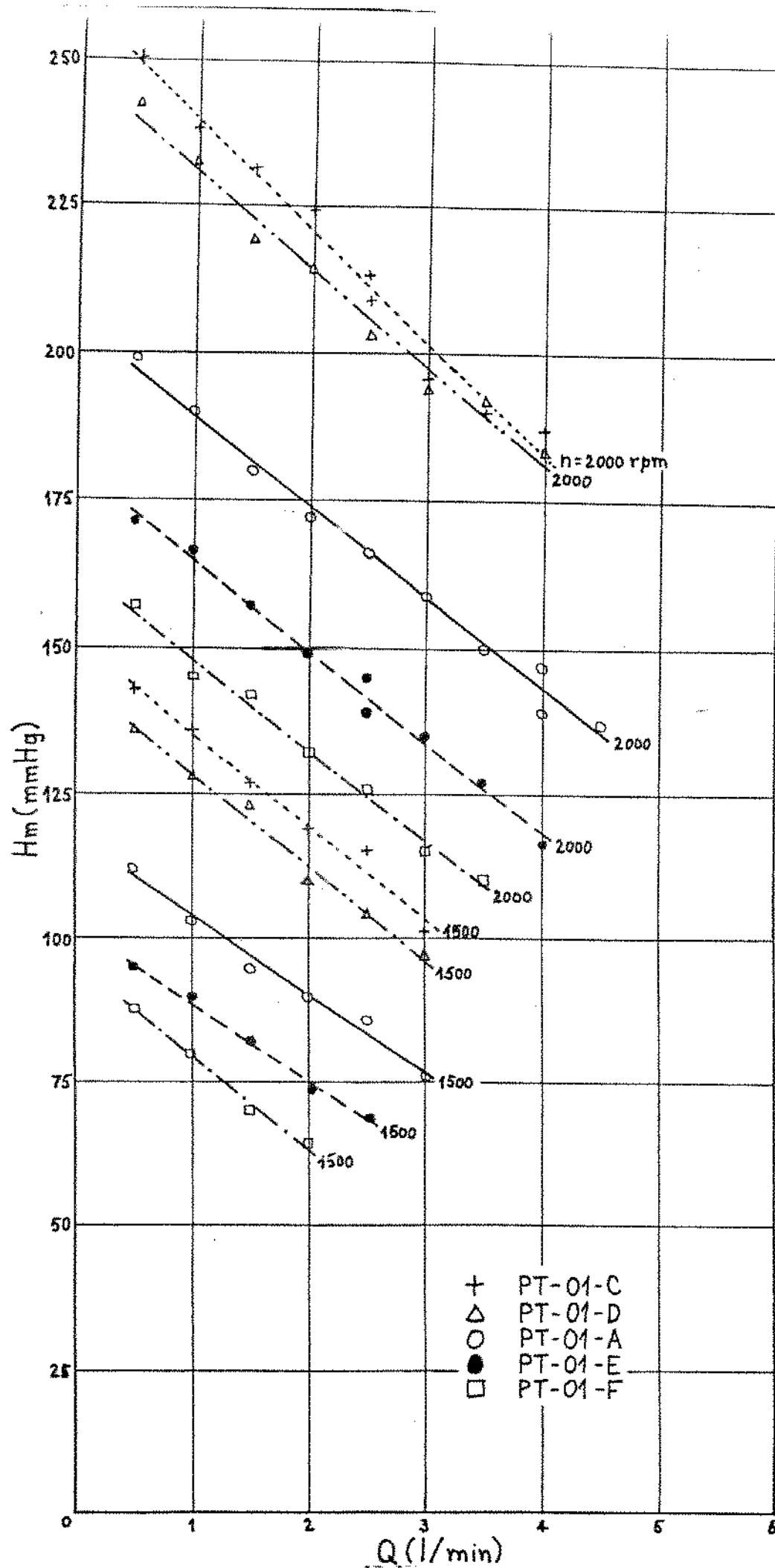


Fig.20 Resultados experimentais comparativos entre os protótipos PT-01-A, C, D, E e F.

comparando-o por meio de uma analogia física ao sistema de discos paralelos descrito no Capítulo 4.

Os dados de entrada utilizados na aplicação do programa foram definidos em função das características geométricas do PT-01-A (Anexo C) e das características físicas do fluido utilizado (item 3.3.2). O valor do espaçamento entre os discos foi assumido por analogia como sendo igual ao espaçamento entre o rotor e a tampa da bomba, tomado numa normal às suas superfícies.

Raio interno	=	0,0025 m
Raio externo	=	0,0625 m
Espaçamento	=	0,004 m
Rugosidade	=	0,0001 m
Viscosidade	=	0,004 N.s/m ²
Densidade	=	1.090 kg/m ³

O Anexo G contém as listagens dos resultados obtidos com esta aplicação do programa MODELO MATEMÁTICO, sendo que cada listagem corresponde a uma determinada condição de operação da bomba, definida por uma rotação e por uma vazão. Os desvios relativos máximos (definidos no Anexo F) foram mantidos entre 0,01 e 0,02.

A partir dos resultados apresentados nas listagens do Anexo G, foi possível traçarmos as curvas características teóricas do protótipo PT-01-A. Os gráficos das Figs. 21, 22, 23, 24 e 25 apresentam as curvas de altura manométrica (H_m), potência total fornecida pelo rotor ao fluido (P_r) e rendimento da bomba (η) em função da vazão (Q), para cinco valores diferentes de rotação (n) do rotor. Para cada um destes cinco gráficos, os cálculos foram realizados para a mesma faixa de vazões abrangida pelos resultados experimentais.

Uma análise comparativa de tais curvas permite-nos algumas interpretações físicas interessantes. É possível notarmos inicialmente que as curvas do rendimento em função da vazão resultam praticamente coincidentes para as cinco rotações escolhidas, e que elas apresentam um comportamento crescente para vazões baixas até atingirem um patamar quase constante situado em torno de 16% para vazões superiores a 2 l/min. Por outro lado, as curvas de potência do rotor e de altura

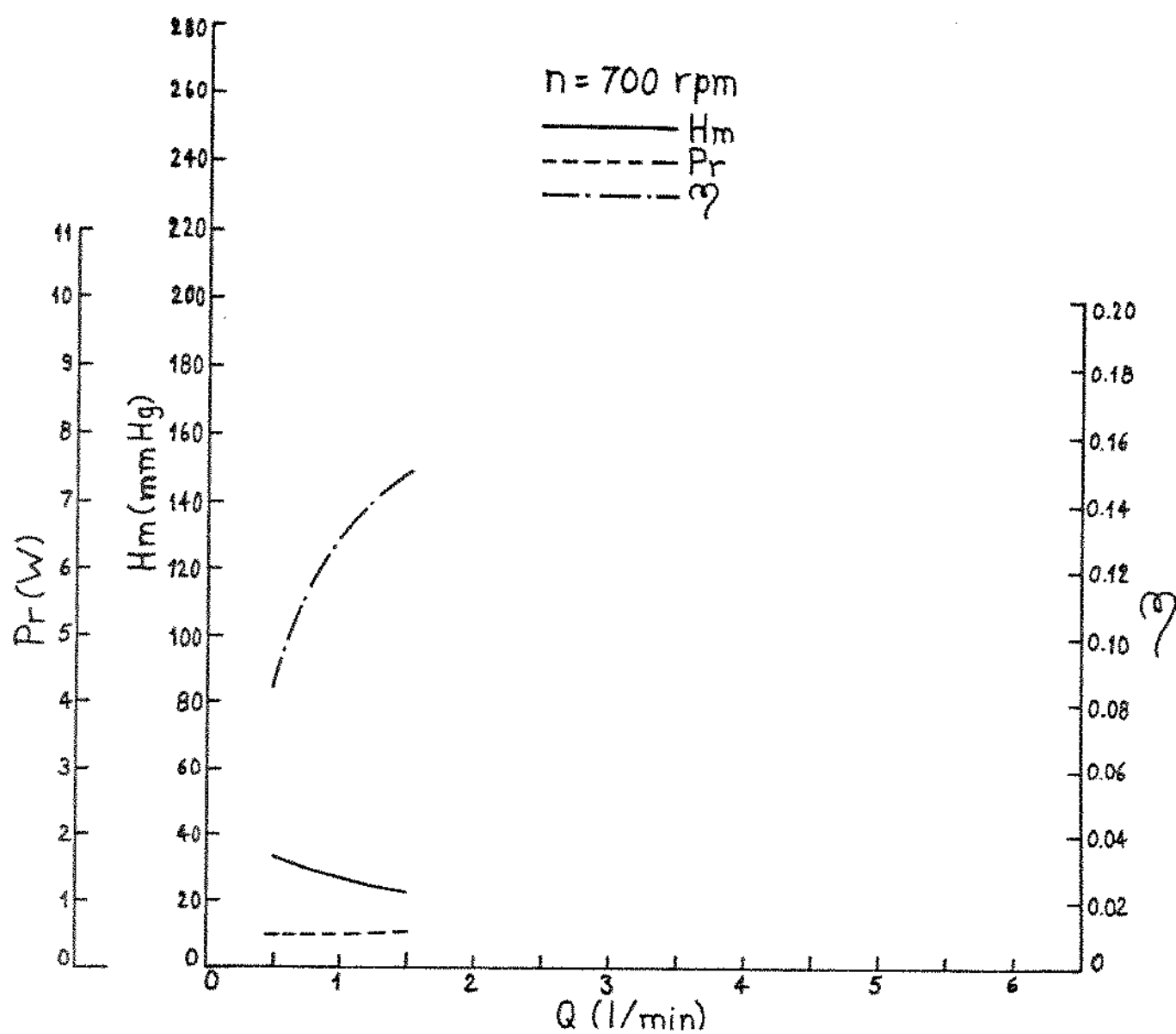


Fig.21 Curvas características obtidas teoricamente para o protótipo PT-01-A (700 rpm).

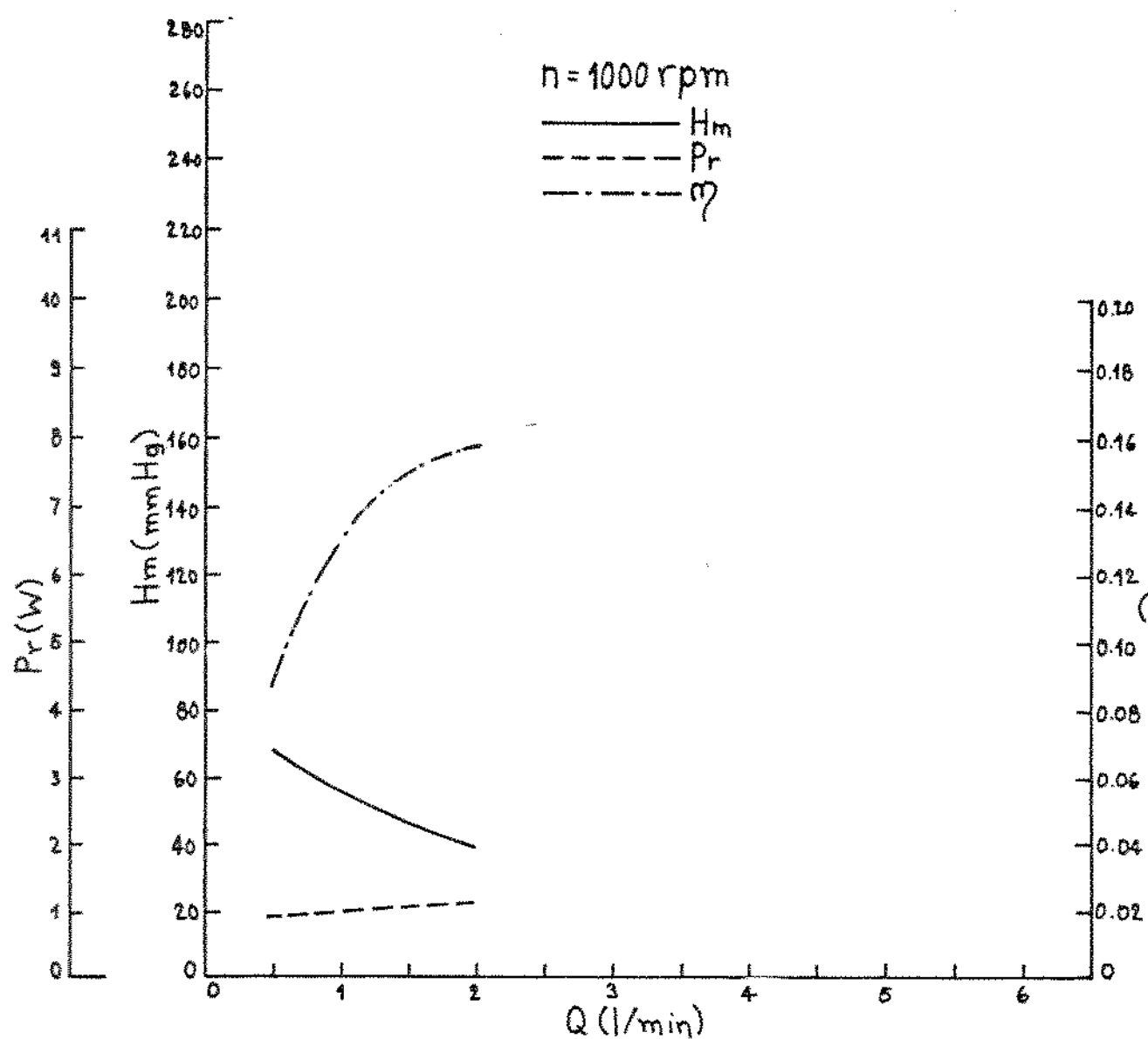


Fig.22 Curvas características obtidas teoricamente para o protótipo PT-01-A (1000 rpm).

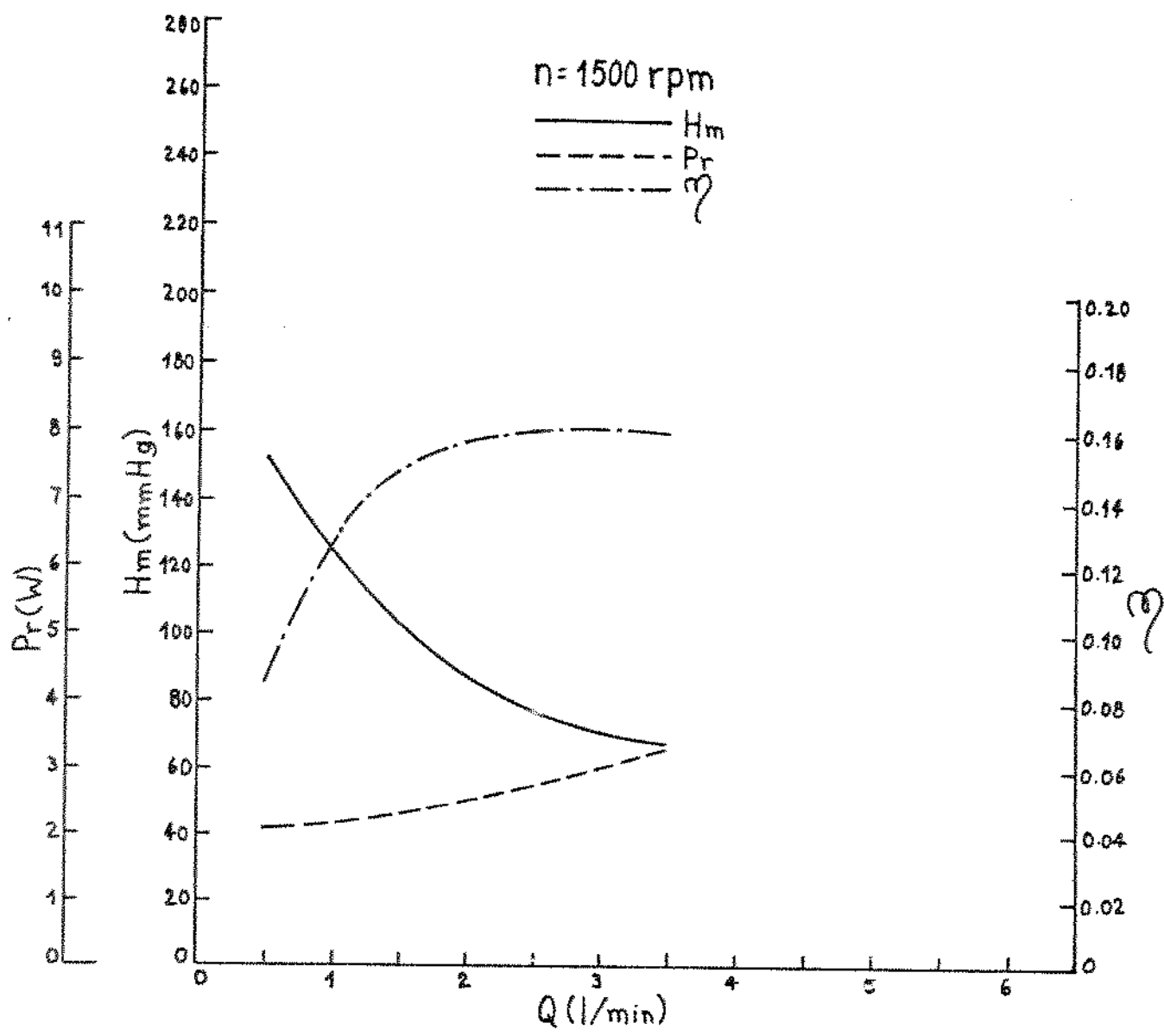


Fig. 23 Curvas características obtidas teoricamente para o protótipo PT-01-A (1500 rpm).

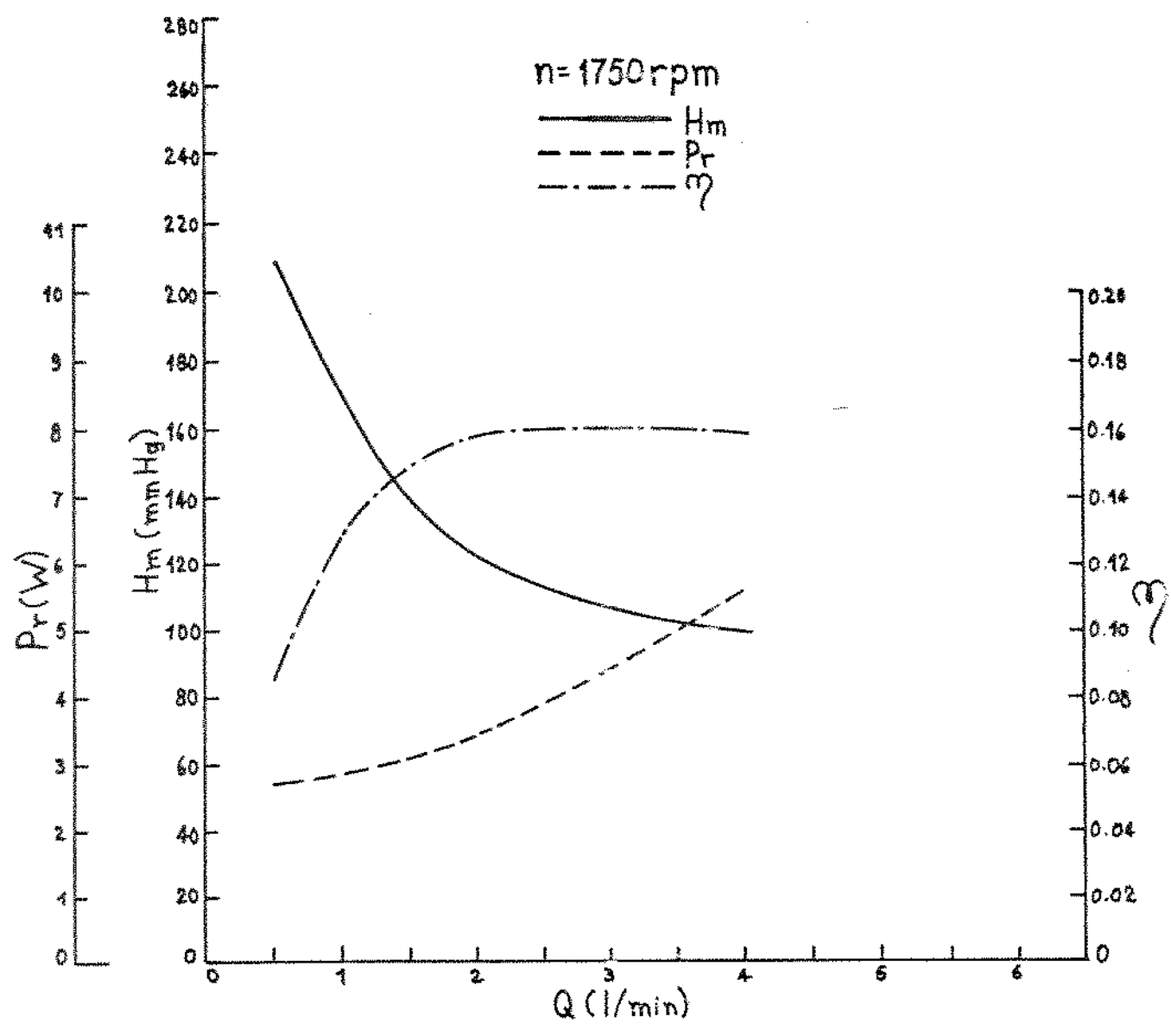


Fig.24 Curvas características obtidas teoricamente para o protótipo PT-01-A (1750 rpm).

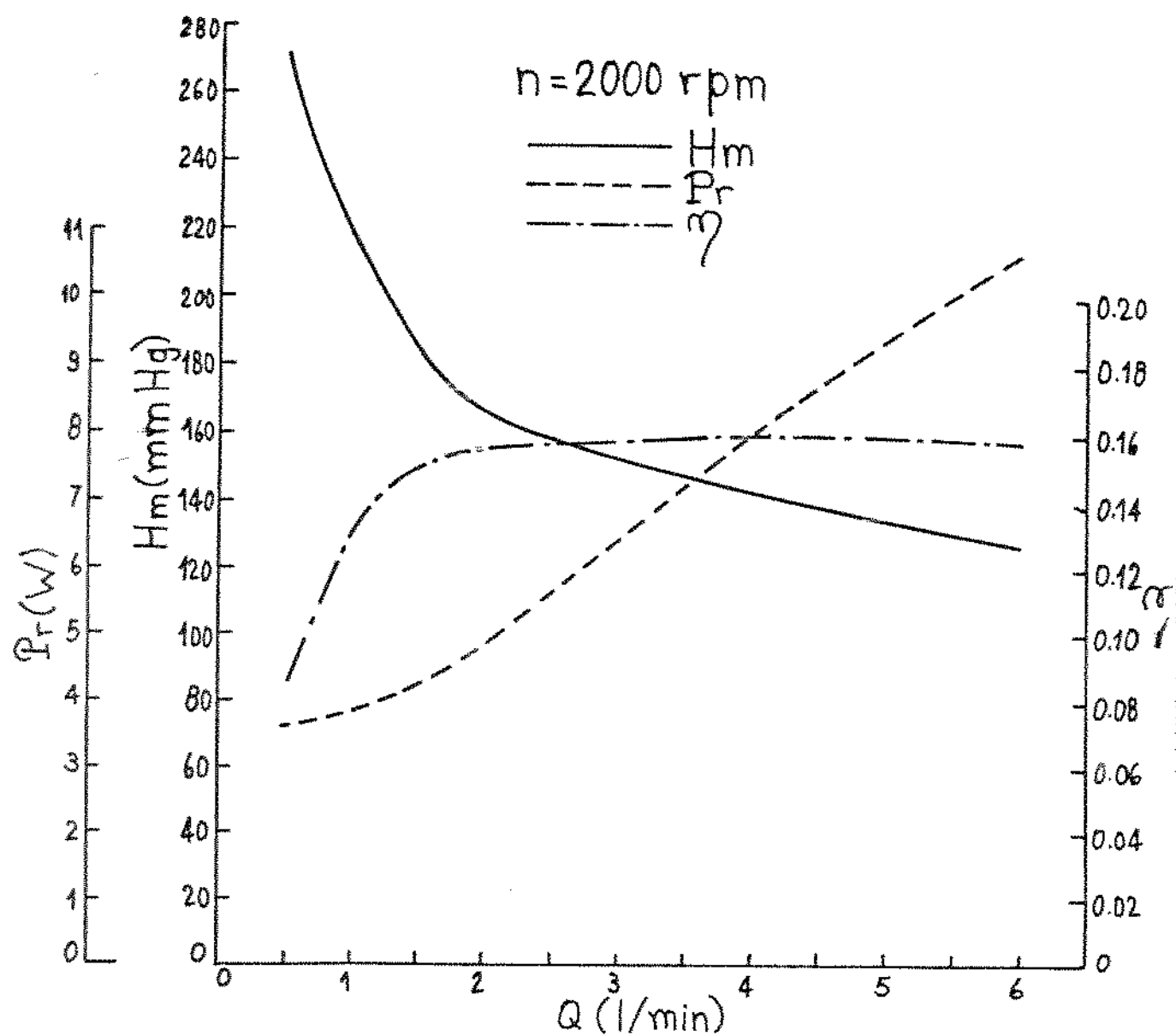


Fig.25 Curvas caracter(ísticas obtidas teoricamente para o protótipo PT-01-A (2000 rpm).

manométrica sofre deslocamentos para cima com o incremento da rotação. Para vazões superiores a 2 l/min, a potência do rotor teórica passa a apresentar um crescimento praticamente linear com o incremento da vazão, enquanto que as curvas teóricas de altura manométrica para esta mesma faixa de vazões apresentam um decaimento menos acentuado em comparação à faixa de vazões mais baixa, aproximando-se mais nesta região do comportamento de uma bomba de pressão constante. Isto nos leva à conclusão que, teoricamente, existe uma faixa ideal de vazões para o funcionamento da bomba, que no caso analisado se situaria acima de 2 l/min. Esta análise recomendaria portanto que um procedimento de otimização do projeto da bomba buscasse para esta uma configuração em que a faixa ideal de vazões determinada teoricamente abrangesse os valores fisiológicos normais de débito cardíaco em humanos (esta conclusão será melhor interpretada no item 5.4).

As listagens do Anexo G apresentam ainda outros resultados teóricos úteis para uma futura otimização do projeto da bomba, tais como: as distribuições radiais das velocidades tangencial e radial do fluido, a potência líquida, o número de Reynolds máximo e a máxima tensão de cisalhamento no interior da bomba.

5.4 DISCUSSÃO

Uma primeira conclusão que podemos tirar a partir dos resultados experimentais apresentados neste capítulo diz respeito ao funcionamento plenamente satisfatório deste primeiro protótipo, comprovando-se então na prática a viabilidade técnica da construção de uma bomba centrífuga com rotor liso operando sob o princípio do arrasto viscoso.

Com relação aos resultados teóricos apresentados neste capítulo, podemos dizer inicialmente que estes apresentaram uma boa coerência entre si.

Resta então confrontarmos os resultados experimentais e os resultados teóricos obtidos, para tirarmos algumas conclusões importantes e para verificarmos a validade do modelo matemático desenvolvido.

Para facilitar uma comparação entre tais resultados experimentais e teóricos obtidos para o protótipo PT-01-A, construímos o gráfico da Fig. 26 a partir dos resultados apresentados nos itens 5.2 e 5.3. Este gráfico apresenta curvas de altura manométrica (H_m) em função da vazão (Q) para cinco valores diferentes de velocidade do rotor. Os pontos marcados no gráfico correspondem aos resultados experimentais obtidos, sendo mostrados juntamente com os seus respectivos resultados teóricos indicados por linhas cheias.

Notamos neste gráfico que a partir de uma vazão aproximadamente igual a 2 l/min, passa a ocorrer uma coincidência muito boa entre os valores de altura manométrica medidos experimentalmente e os valores calculados teoricamente. Para vazões mais baixas, os valores de altura manométrica calculados teoricamente resultam maiores do que aqueles levantados experimentalmente, sendo este erro crescente com o aumento da rotação.

Uma conclusão que podemos extrair imediatamente a partir desta observação é que aquela determinação teórica de uma faixa de vazões supostamente ideal (item 5.3) corresponde na verdade à faixa de vazões onde o modelo matemático é fiel à realidade física do escoamento, determinando um comportamento linear da altura manométrica em função da vazão.

Como consequência, podemos concluir também que os próprios resultados do modelo matemático são capazes de fornecer indicações sobre a faixa de vazões para a qual os resultados teóricos obtidos são confiáveis, o que se constitui numa característica extremamente importante deste modelo.

Para efeito de uma futura avaliação mais completa do protótipo, os valores de tensão de cisalhamento máxima calculados pelo programa MODELO MATEMÁTICO poderão ser comparados aos máximos valores admissíveis de tensão de cisalhamento que não causam traumatismos às células do sangue [26]. Entretanto, é preciso interpretar com cuidado tais resultados, pois os valores reais de tensão de cisalhamento poderão ser maiores do que aqueles calculados,

RESULTADOS EXPERIMENTAIS :

- 2000 rpm
- △ 1750 rpm
- 1500 rpm
- + 1000 rpm
- 700 rpm

— RESULTADOS TEÓRICOS

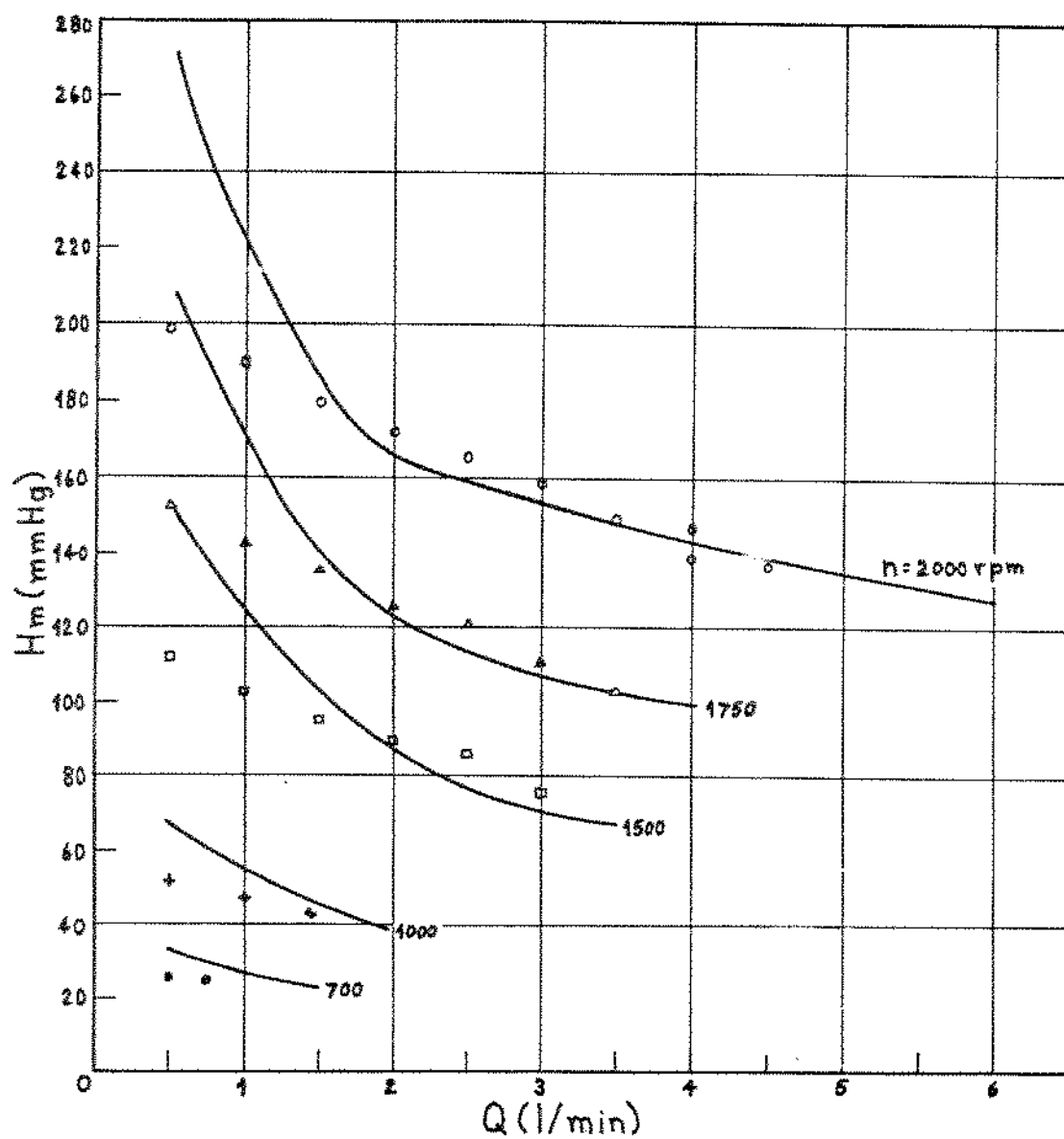


Fig.24 Comparação entre os resultados experimentais e teóricos obtidos para o protótipo PT-01-A.

devido a possíveis distorções no escoamento não previstas pelo modelo matemático.

Vale ressaltarmos ainda que o modelo matemático não prevê a presença de zonas de estagnação e a ocorrência de cavitação no escoamento, fenômenos estes que seriam extremamente indesejáveis na prática e que deveriam ser investigados através de novas técnicas de análise ou de experimentação.

Vimos acima que o modelo matemático mostrou-se bastante preciso para uma faixa de vazões superiores a 2 l/min, apresentando entretanto erros crescentes em função da diminuição da vazão (principalmente para as rotações maiores). As condições onde os erros apresentaram-se significativos correspondem exatamente às situações em que o efeito da aceleração centrífuga no escoamento é preponderante sobre o efeito da aceleração convectiva [49], causando distorções no escoamento não previstas pelo modelo matemático.

Podemos explicar estas imprecisões do modelo matemático para baixas vazões através de dois motivos principais:

1. Simplificações assumidas no próprio desenvolvimento do modelo matemático do escoamento do fluido através de um sistema de discos (Capítulo 4).
2. Aplicação do modelo matemático citado acima a um sistema físico mais complexo, que se constitui no protótipo PT-01-A.

Assim, além das simplificações descritas no Capítulo 4, os seguintes fatores não foram considerados pela análise teórica realizada: curvatura do rotor e da tampa da bomba, escoamento entre o rotor e a base da bomba, perdas de carga na sucção e na descarga, atrito do fluido com a superfície cilíndrica lateral da tampa da bomba, etc.

VI - CONCLUSÕES

A partir de uma extensa revisão bibliográfica sobre o bombeamento artificial de sangue, pudemos verificar o crescente destaque que alguns modelos especiais de bombas centrífugas vêm ganhando ultimamente dentro deste campo. Sob o ponto de vista da Engenharia, estas bombas possuem uma série de vantagens construtivas e funcionais se comparadas às bombas pulsáteis de sangue (que procuram reproduzir aproximadamente o princípio de funcionamento do coração), além de causarem um índice de hemólise consideravelmente mais baixo.

Entretanto, uma das maiores limitações das bombas centrífugas de sangue atualmente diz respeito ao apoio de seu rotor. Este é um problema cuja solução encontra-se em fase de desenvolvimento através do emprego de tecnologias e materiais avançados. Com relação à curva de pressão sanguínea, pesquisas recentes têm mostrado que o organismo dos mamíferos pode se adaptar a um fluxo não-pulsátil no sistema circulatório.

Realizamos um extenso trabalho teórico-experimental que se constituiu na primeira parte de um projeto visando o desenvolvimento de uma bomba centrífuga de sangue no CTPE do IDPC (São Paulo - SP) em conjunto com a UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas).

O trabalho experimental consistiu basicamente na construção de um protótipo de bomba centrífuga de sangue com rotor de superfície lisa, e também de uma bancada de teste para a experimentação deste protótipo com um fluido de propriedades físicas análogas às do sangue.

A primeira conclusão que pudemos obter consistiu na viabilidade prática do funcionamento de uma bomba deste tipo. Além disto, as curvas características experimentais de altura manométrica em função da vazão apresentaram um decaimento praticamente linear e pouco acentuado, sendo este um comportamento desejável numa bomba de sangue para facilitar a manutenção de uma pressão arterial aproximadamente constante. Os ensaios foram realizados para diversos valores de velocidade do rotor (até o máximo permitido pelo motor elétrico utilizado), sendo inclusive testadas algumas variações geométricas do protótipo.

Deduzimos um modelo matemático escrito para um espaço bidimensional, o qual foi resolvido em microcomputador para a simulação numérica das mesmas condições encontradas nos ensaios experimentais. Calculamos para o protótipo curvas características de altura manométrica, potência e rendimento em função da vazão.

Para vazões superiores a 2 l/min, houve uma coincidência muito boa entre as curvas características de altura manométrica obtidas experimentalmente e teoricamente. Concluimos também que os próprios resultados teóricos obtidos são capazes de indicar a faixa de vazões em que o modelo é mais confiável, sendo esta uma característica extremamente importante. A determinação do rendimento da bomba foi feita apenas teoricamente, situando-se num patamar quase constante de 16% para vazões superiores a 2 l/min. Calculamos ainda outras grandezas importantes do escoamento para uma maior compreensão deste.

Em função dos resultados obtidos neste trabalho, podemos dizer que o modelo matemático desenvolvido será de extrema valia num futuro trabalho de otimização deste projeto, apesar das simplificações assumidas na sua dedução.

VII - SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO

Como sugestões para uma futura continuidade deste trabalho, destacamos abaixo alguns tópicos que poderiam ser abordados.

1. Utilização do modelo matemático para a simulação de novas configurações e condições de operação da bomba centrífuga de sangue, procurando assim otimizar o projeto desta.
2. Projeto, construção e experimentação de novos protótipos.
3. Realização de uma análise dimensional do problema do escoamento do fluido na bomba, possibilitando uma descrição matemática e uma apresentação de resultados através de parâmetros mais genéricos (adimensionais).
4. Análise de incertezas na apresentação dos resultados experimentais.
5. Aprimoramento da bancada de teste, para a obtenção de rotações mais altas e para o levantamento experimental das curvas de potência e de rendimento dos protótipos.
6. Realização de outros ensaios descritos no item 3.3.1, incluindo os ensaios "in vivo".
7. Estudo mais detalhado sobre as faixas de variação de parâmetros para as quais o modelo matemático pode ser considerado válido.
8. Extensão do modelo matemático para uma configuração de bomba com rotor de múltiplos cones.
9. Aperfeiçoamento do modelo matemático com a inclusão de novos fenômenos fluidodinâmicos que não foram considerados neste trabalho, tais como: recirculações, tratamento diferencial na direção axial (z), comportamento não-newtoniano do sangue, e outros.

10. Calibração de eventuais parâmetros de um modelo matemático mais sofisticado através de resultados experimentais.
11. Redução das dimensões da bomba para diminuir o volume de sangue extra-corpo ("priming").
12. Análise de outros aspectos do projeto que foram levantados no item 2.6, incluindo o desenvolvimento do mancal, o acionamento magnético do rotor, e outros.

ANEXO A - O SISTEMA CARDIOVASCULAR.

O coração e os vasos sanguíneos (artérias, veias e capilares) fazem parte do chamado sistema cardiovascular, que é um sistema de transporte que distribui a todas as células do corpo os materiais necessários para o seu funcionamento adequado e retira de todo o corpo os produtos de seu metabolismo (vide Figura).

O coração é um órgão que tem a função de bombear para as artérias o sangue que chega das veias, mantendo assim a circulação. Para poder desempenhar a sua função de bomba, o coração conta com quatro câmaras (2 átrios e 2 ventrículos) e com quatro válvulas, possuindo ainda células especializadas nas funções de geração e propagação de estímulos elétricos responsáveis pela sua contração. É esta contração ritmada do músculo cardíaco (miocárdio) que fornece às artérias um fluxo pulsátil de sangue.

O coração encontra-se "dividido" em duas partes separadas entre si, cada uma contendo um atrio e um ventrículo: o coração direito, que bombeia o sangue para a circulação pulmonar, e o coração esquerdo, que bombeia o sangue para a circulação sistêmica (que supre os tecidos do corpo) e que consome a maior parte do trabalho desenvolvido pelo miocárdio. As válvulas cardíacas têm a função de permitir o fluxo de sangue em apenas um sentido, localizando-se na entrada e na saída de cada ventrículo.

O ciclo cardíaco é dividido em duas fases: a diástole e a sístole. A diástole corresponde ao período de enchimento dos ventrículos com o sangue, seguindo-se então a sístole, que é o período em que o coração se contrai bombeando o sangue para o interior das artérias. O bombeamento do sangue é feito basicamente pelos ventrículos, tendo os átrios a função de antecâmaras.

Débito cardíaco é o nome que se dá ao volume de sangue bombeado pelo coração por unidade de tempo, sendo normalmente medido em litros por minuto. Pode ser calculado como o produto da frequência cardíaca (número de batimentos

por minuto) pelo volume sistólico (número de litros ejetados por cada ventrículo em um batimento). Os valores dessas grandezas variam em função de uma série de fatores, tais como: idade do indivíduo, peso, sexo, atividade que está sendo realizada pelo corpo e outros. Apenas como ilustração, podemos citar alguns valores normais representativos para um coração natural:

- Débito Cardíaco	= 5 l/min
- Frequência Cardíaca	= 70 batimentos/min
- Volume Sistólico	= 0,07 l = 70 ml
- Pressão Arterial Sistêmica Máxima	= 120 mmHg
- Pressão Arterial Sistêmica Mínima	= 80 mmHg
- Potência Desenvolvida pelo Coração	= 2,0 W
- Pressão Venosa:	< 10 mmHg

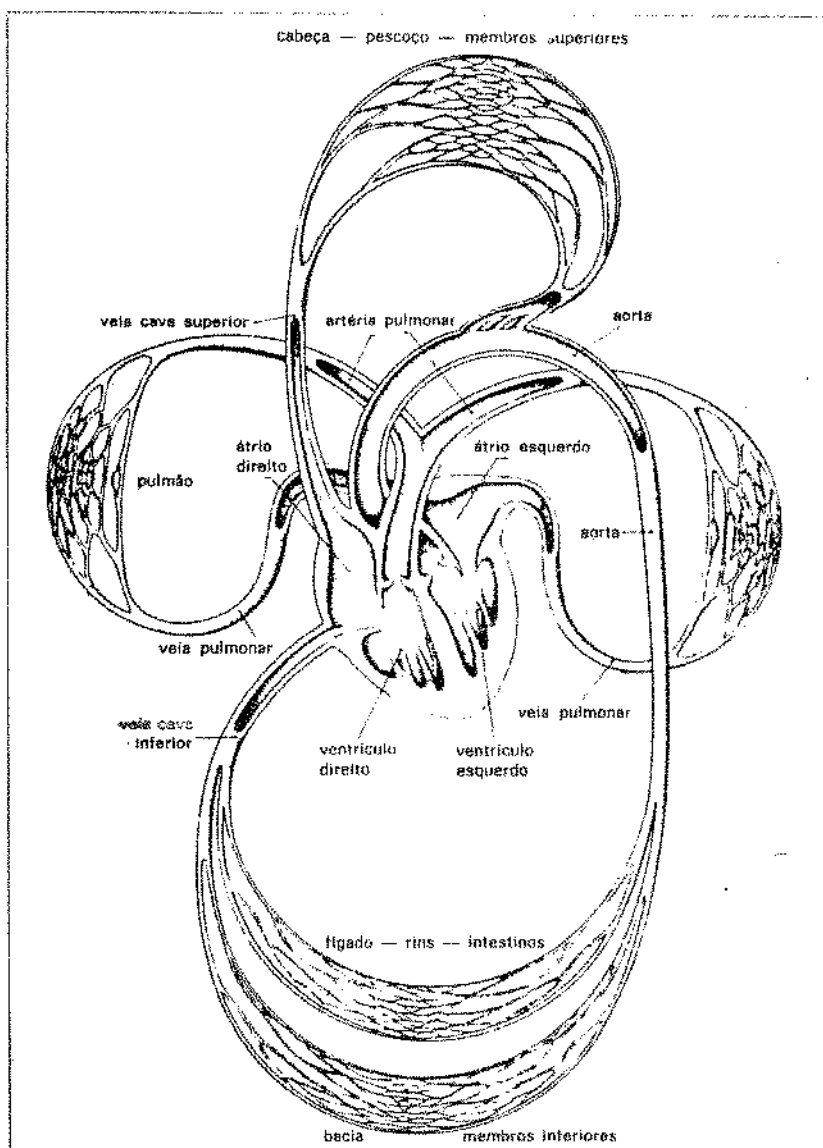
Para variar seus parâmetros operacionais de modo a suprir adequadamente as necessidades fisiológicas do organismo, o sistema cardiovascular conta com uma série de mecanismos nervosos e hormonais de controle. O próprio coração possui uma importante capacidade de auto-regulação, que se chama Lei Frank-Starling. Esta lei diz que, dentro de certos limites fisiológicos e anatômicos, o coração bombeará todo o sangue que a ele afluir retornando das veias. Ou, em outras palavras, o débito cardíaco aumenta com o incremento da pressão de enchimento do coração, respeitados os limites fisiológicos e anatômicos.

O sangue é o fluido que circula no interior do sistema cardiovascular e que realiza as funções de transporte já discutidas acima. É constituído principalmente de uma parte líquida (plasma) e por alguns importantes grupos de células, destacando-se entre outros:

- hemácias ou glóbulos vermelhos, que carregam a hemoglobina e que têm a função de se combinar com o oxigênio que leva às células e com o gás carbônico que retira destas;
- leucócitos ou glóbulos brancos, que fazem parte da defesa do organismo;
- plaquetas, que participam da coagulação sanguínea.

Aliás, é a coagulação do sangue (que se realiza através de sofisticados mecanismos) que faz estancar o sangramento

ocasionado pelo rompimento de algum pequeno vaso ou pela ocorrência de algum corte ou ferimento.



O sistema cardiovascular.

ANEXO B - ACIONAMENTO E CONTROLE DE VELOCIDADE DO ROTOR

Ao lado de todos os problemas mecânicos que se colocam frente ao projeto de uma bomba centrífuga de sangue, somam-se alguns outros importantes problemas de ordem elétrica. Estes dizem respeito principalmente ao acionamento e ao controle de velocidade do rotor da bomba, além de sistemas de emergência (alarmes e baterias), instrumentação em geral e outros.

O sistema de acionamento do rotor da bomba deverá atender a uma série de exigências inerentes à própria natureza deste projeto, destacando-se as seguintes:

1. O sangue no interior da bomba deverá encontrar-se totalmente isolado do meio externo, eliminando-se assim a possibilidade de acionamento mecânico do rotor diretamente através de um eixo atravessando a carcaça da bomba. A transmissão de energia ao rotor deverá portanto ser feita por via magnética. Isto minimizará o risco de contaminação.
2. Possibilidade de controle preciso da velocidade angular do rotor dentro de amplos limites pré-estabelecidos.
3. Confiabilidade e eficiência altas.
4. Vida útil longa com pouca manutenção.
5. Dimensões reduzidas.
6. Viabilidade econômica.

A primeira idéia que poderia surgir seria o acoplamento magnético de dois ímãs permanentes, fixados ao rotor da bomba (no interior desta) e a um motor convencional de corrente contínua posicionado externamente. Esta solução já foi tentada inicialmente no projeto da bomba "Medtronic", tendo sido entretanto abandonada por apresentar insuficiente confiabilidade operacional [50].

A colução mais indicada e que tem sido adotada nos modelos mais recentes de bombas centrífugas de sangue consiste no acionamento do rotor através de um sistema de motor elétrico de corrente contínua, sem escovas e comutado eletronicamente. Este é um tipo de motor que tem encontrado ultimamente crescente aplicação em diversos outros campos da engenharia (robótica, servo-atuadores, computação, propulsão eletromecânica, etc.), e a sua tecnologia tem se desenvolvido de forma acelerada. Passamos a descrever a seguir alguns princípios básicos que regem a construção de um motor deste tipo [51].

Um motor elétrico de corrente contínua sem escovas com comutação eletrônica é constituído por três partes principais: um estator bobinado polifásico (do mesmo tipo que é encontrado em motores de indução de corrente alternada), um rotor formado por polos de ímã permanente e, finalmente, um conjunto eletrônico formado por alguns sensores (comumente de efeito Hall) e por alguns circuitos responsáveis pela excitação sequencial (comutação) e adequada das bobinas do estator. Não há nenhum contato mecânico entre o rotor e o estator, pois não há escovas.

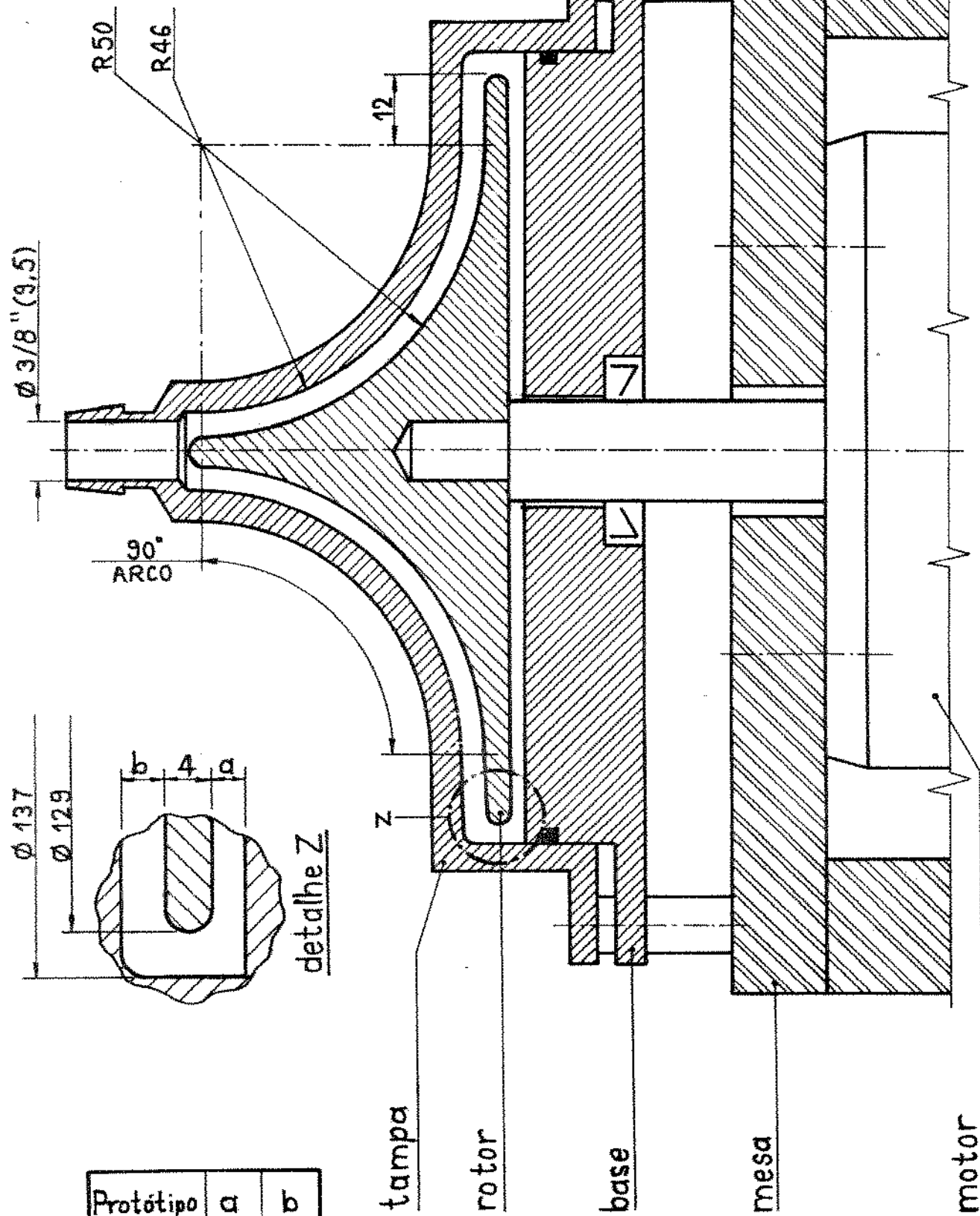
No caso particular das bombas centrífugas de sangue, o próprio rotor contaria com os polos de ímã permanentes, desempenhando assim simultaneamente os papéis de rotor da bomba e do motor elétrico. O estator e demais componentes encontrar-se-iam posicionados externamente à bomba.

ANEXO C - DESENHOS DO PROTÓTIPO

Encontra-se a seguir um desenho de conjunto do protótipo PT-01-A em escala natural, sendo fornecidas as suas principais dimensões.

Para efeito de visualização das variações geométricas realizadas a partir do protótipo PT-01, são fornecidas também representações esquemáticas dos contornos internos das seguintes configurações:

PT - 01 - A
PT - 01 - B
PT - 01 - C
PT - 01 - D
PT - 01 - E
PT - 01 - F

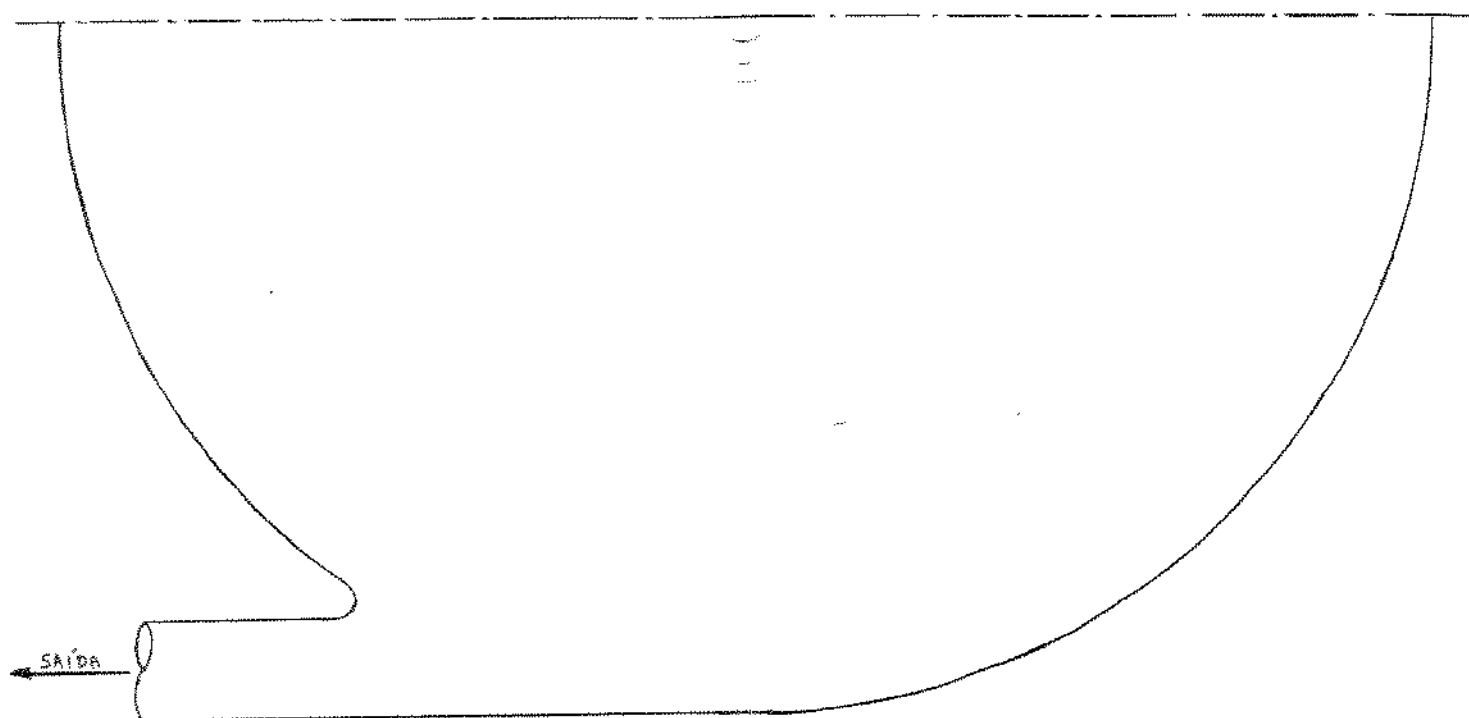


Protótipo	a	b
A	3	4
B	1	4
C	3	65
D	3	5
E	3	3
F	3	2

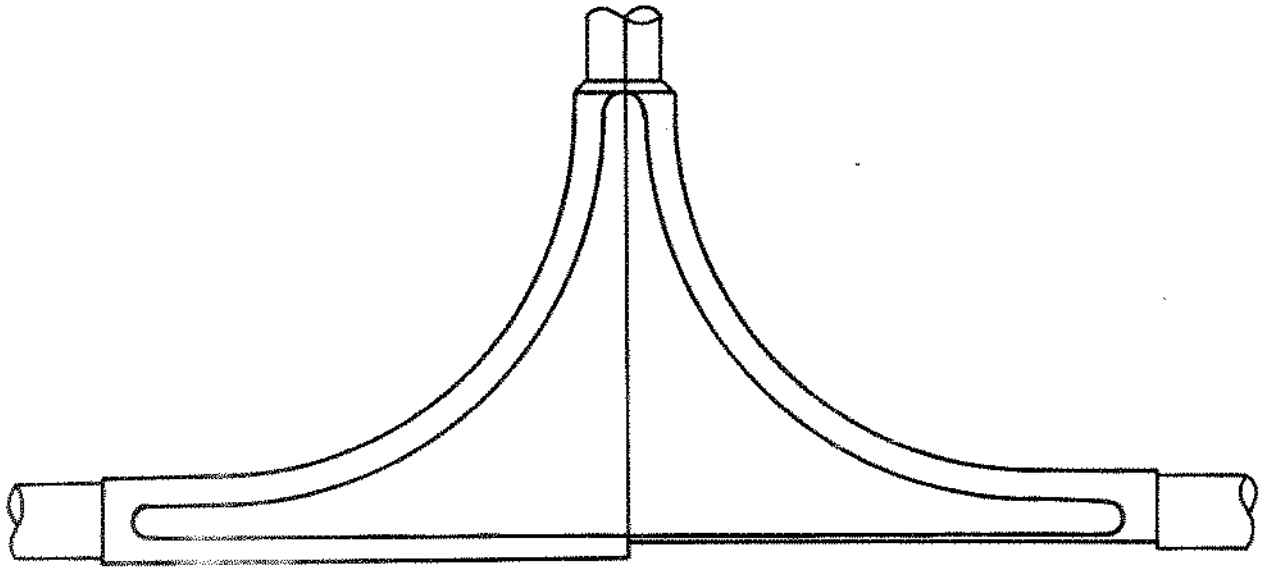
DESENHADO
Gastm
DATA
27-12-89
ESCALA
1:1 (2:1)

BOMBA CENTRÍFUGA DE SANGUE

UNICAMP - IDPC Nº PT-01

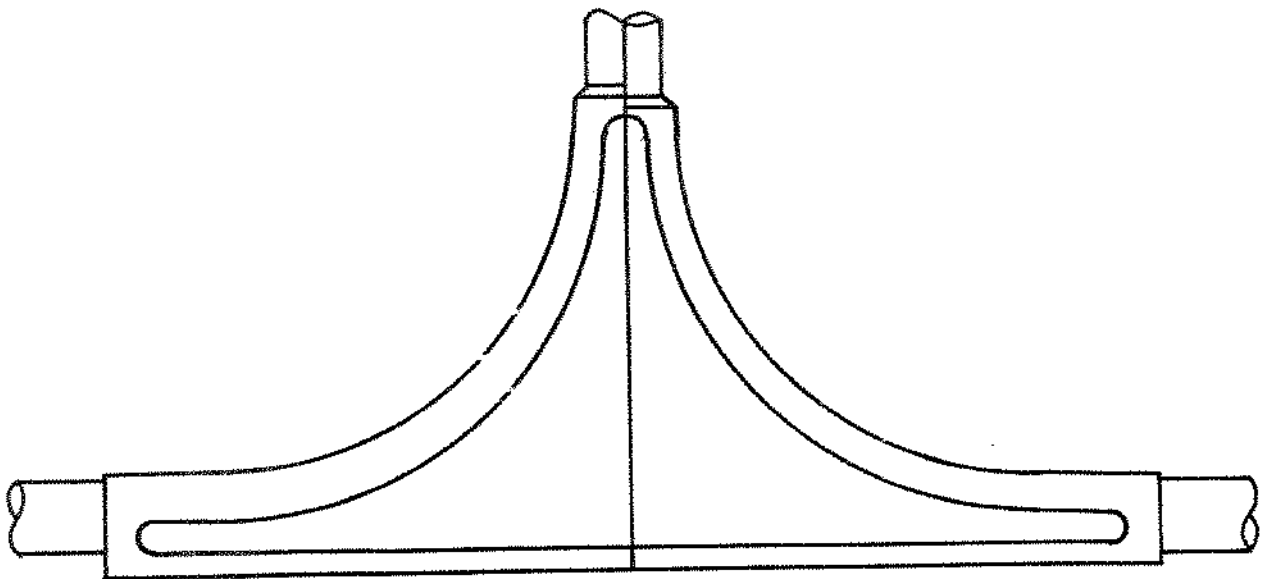
VISTA SUPERIOR

SEM ESCALA



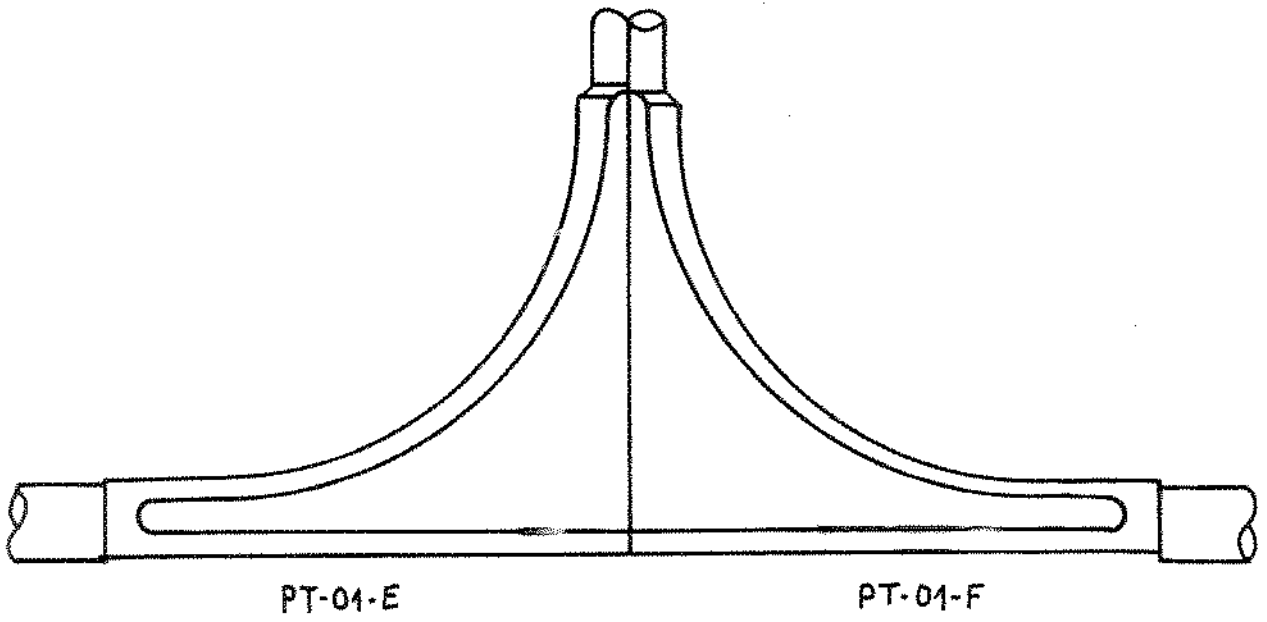
PT-01-A

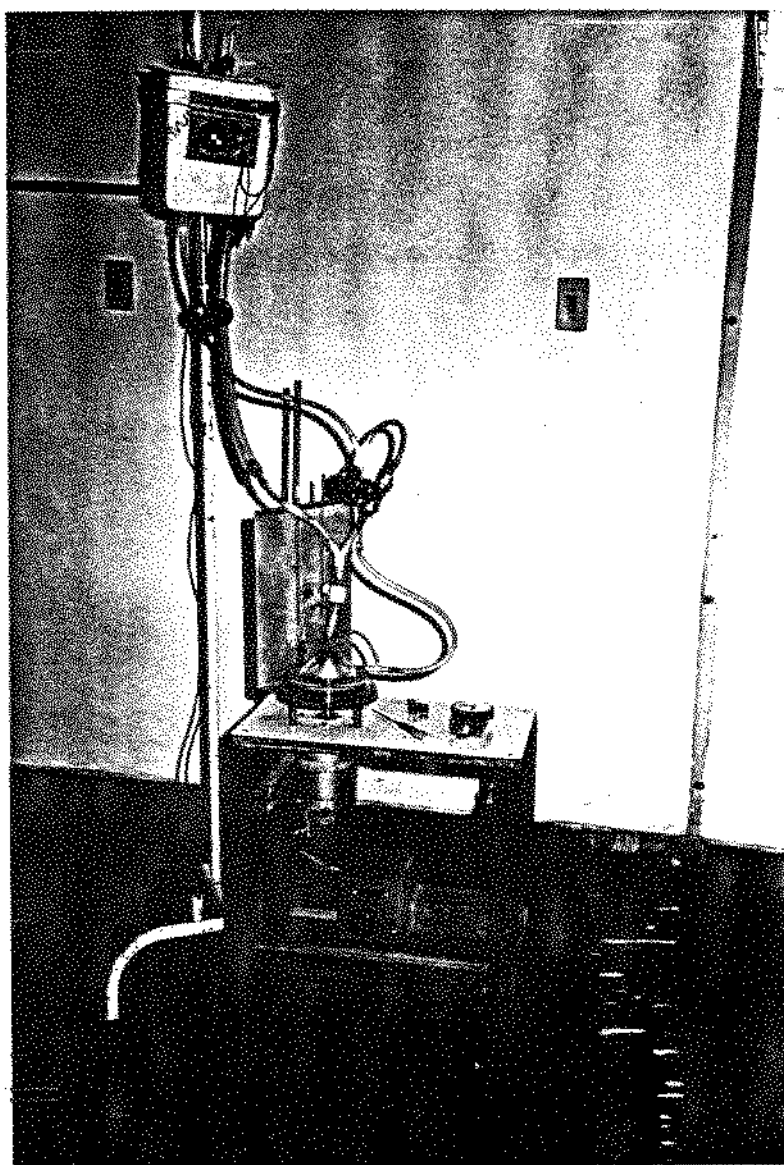
PT-01-B

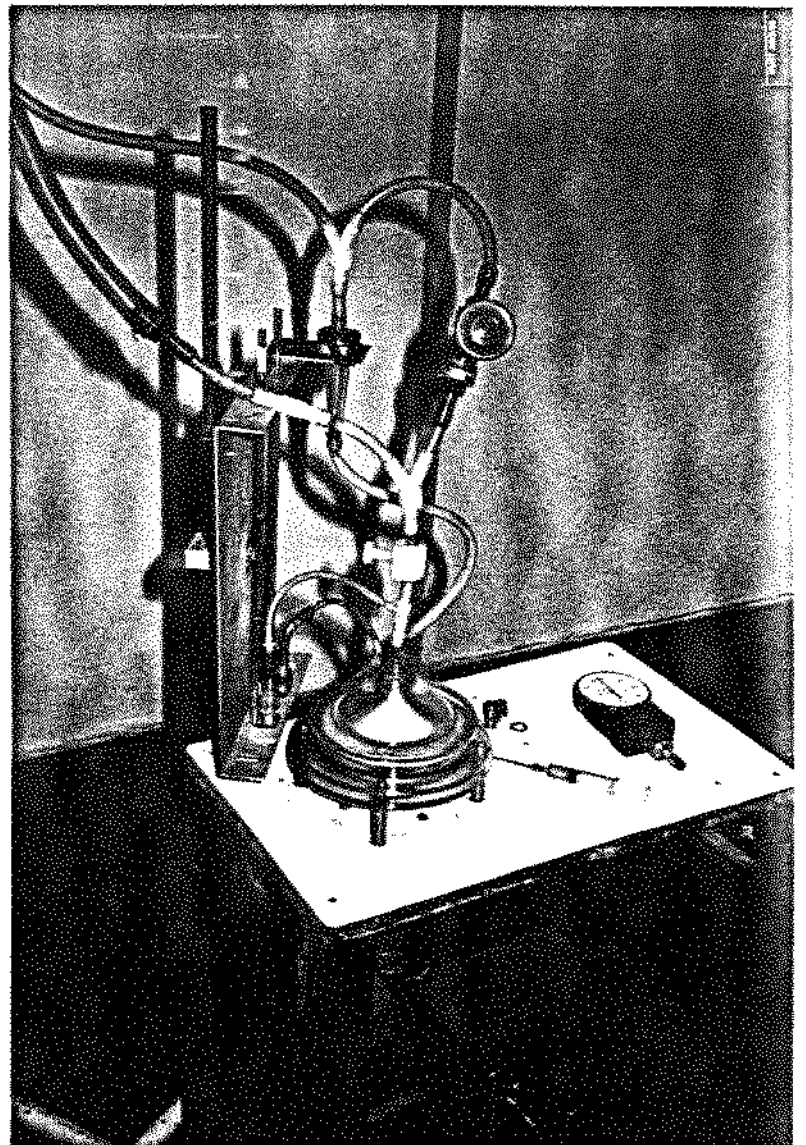
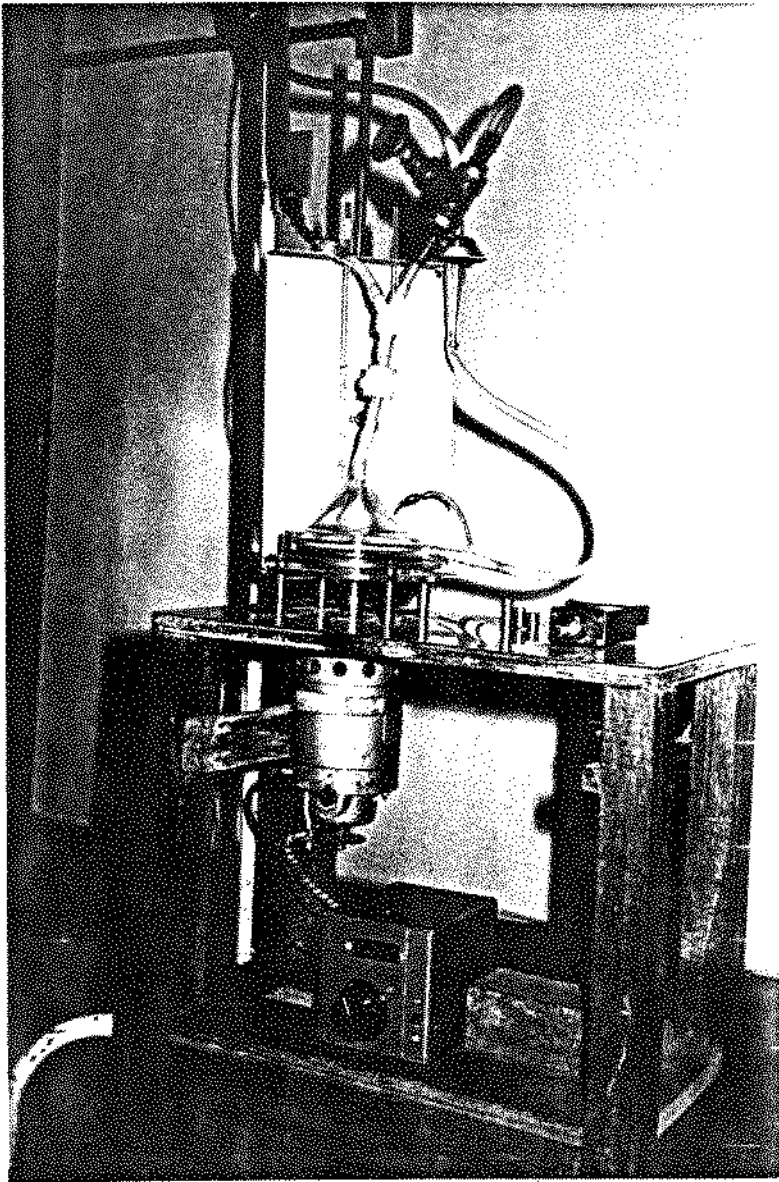


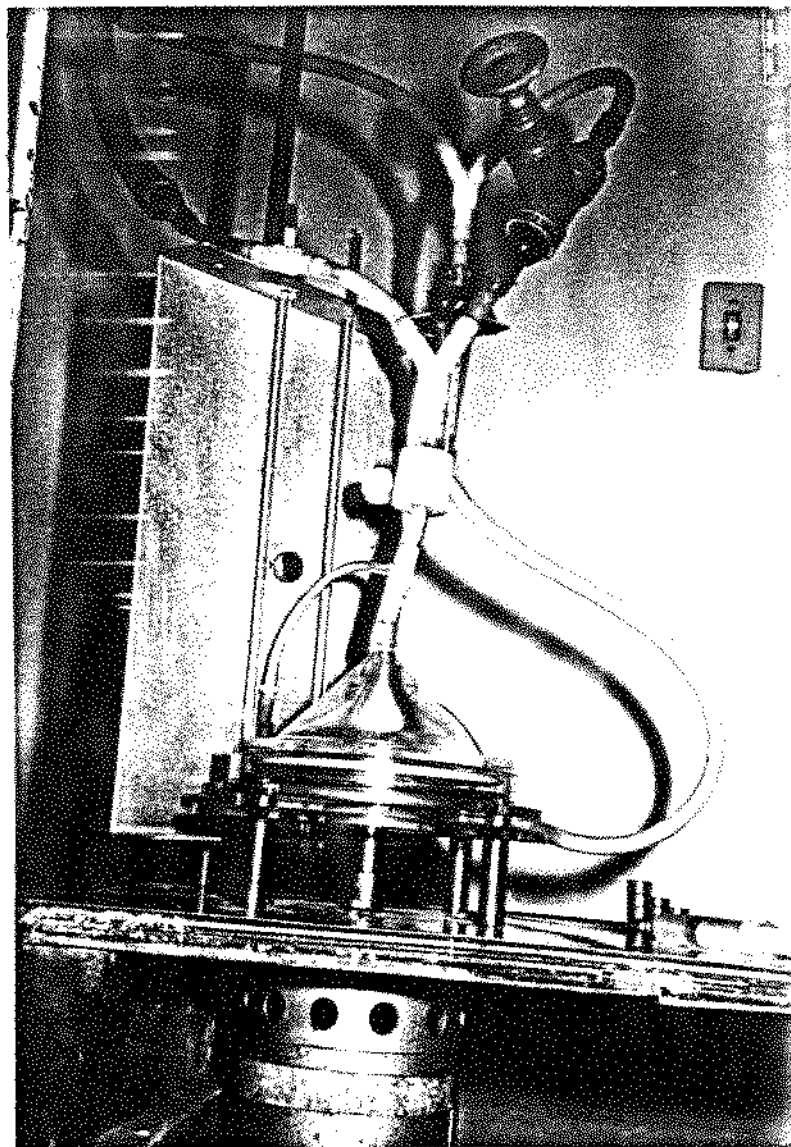
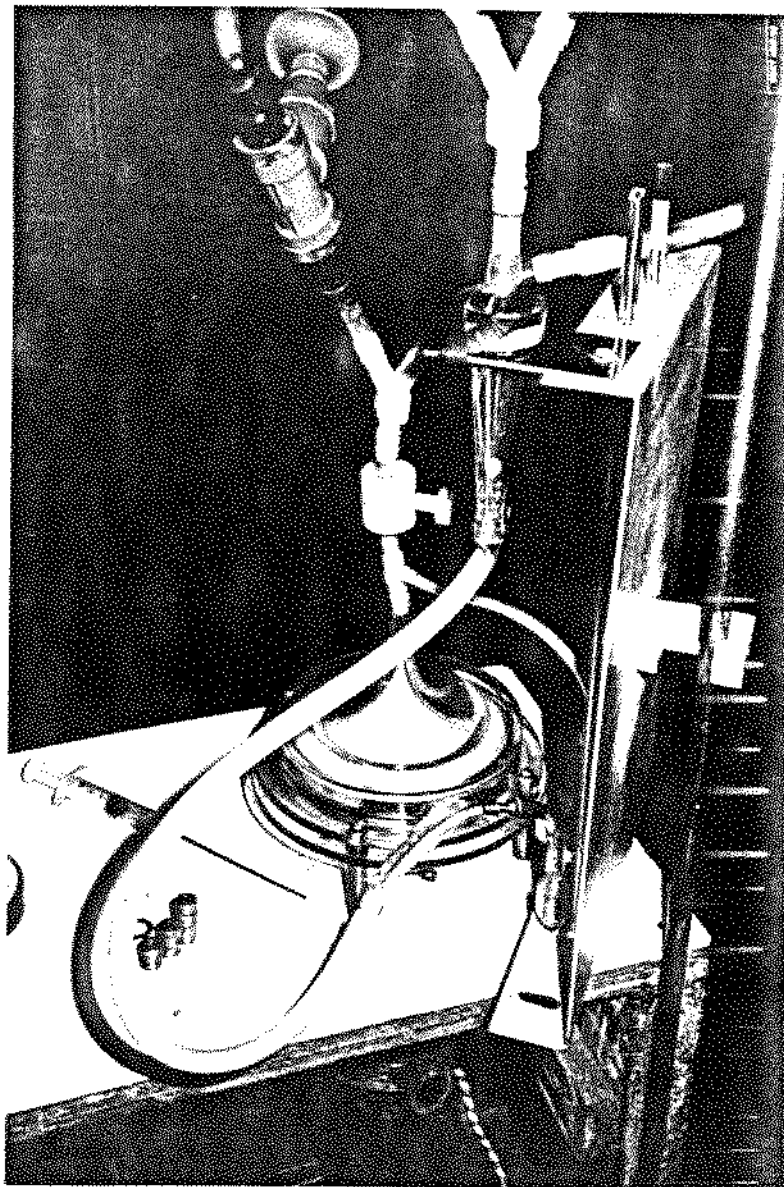
PT-01-C

PT-01-D



ANEXO D - FOTOGRAFIAS





ANEXO E - ALGUMAS DEDUÇÕES MATEMÁTICAS

Este anexo traz algumas deduções auxiliares que são importantes para o perfeito entendimento do desenvolvimento matemático do Capítulo 4.

1. ADEQUAÇÃO DA EQUAÇÃO DE ENERGIA

A eq. (10) do item 4.4.2 foi ali escrita como decorrência de uma equação de energia tomada na forma diferencial. Vamos agora provar matematicamente tal decorrência.

Escrevemos inicialmente a seguinte equação de energia, a qual se distingue da conhecida equação de Euler na forma diferencial apenas pelo termo do trabalho útil ($d\omega_m$) [32].

$$\frac{dp}{\rho} + V_{ABS} dV_{ABS} = d\omega_m$$

Todas as variáveis envolvidas nesta equação dependem somente de r . Podemos então escrever

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} + V_{ABS} \frac{dV_{ABS}}{dr} = \frac{d\omega_m}{dr}$$

A grandeza V_{ABS} coincide com V_{a2} (item 4.4.2), valendo

$$V_{ABS} = (u^2 + v^2)^{1/2}$$

derivando em relação a r , resulta

$$\frac{dV_{ABS}}{dr} = \frac{1}{2} \frac{1}{(u^2 + v^2)^{1/2}} \left(2u \frac{du}{dr} + 2v \frac{dv}{dr} \right)$$

ou

$$\frac{dV_{ABS}}{dr} = \frac{1}{V_{ABS}} \left(u \frac{du}{dr} + v \frac{dv}{dr} \right)$$

Substituindo na equação obtida anteriormente, temos o resultado que procuramos

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} + u \frac{du}{dr} + v \frac{dv}{dr} = \frac{dwm}{dr}$$

2. ANÁLISE EXATA DE UM CASO PARTICULAR

Vamos considerar agora a análise teórica exata do escoamento laminar, unidirecional e em regime permanente de um fluido incompressível, viscoso e newtoniano que se movimenta entre duas placas infinitas e dispostas paralelamente entre si, sendo que uma delas encontra-se estacionária e a outra possui uma velocidade constante de translação ($\underline{U}$) no mesmo sentido do escoamento (Vide Figura). Nestas condições, e na ausência de forças de campo, as equações de Navier-Stokes escritas em coordenadas cartesianas assumem a forma abaixo, para o plano $\underline{Oxy}$ e com $\partial u / \partial x = 0$ [32]

$$\text{direção } \underline{x} \rightarrow -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

$$\text{direção } \underline{y} \rightarrow -\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

A equação (2) implica em que a pressão p depende somente de $\underline{x}$. A equação (1) pode ser escrita então com derivadas totais, sob a seguinte forma

$$\frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

Integrando duas vezes em relação a $\underline{y}$

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + A y + B \quad (3)$$

onde A e B são constantes de integração, a serem determinadas com o auxílio das condições de contorno do problema

$$\begin{aligned} y=0, u=0 &\Rightarrow 0=B \\ y=b, u=U &\Rightarrow U = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} b^2 + Ab + B \end{aligned}$$

Substituindo agora em (3) as expressões obtidas para A e B, temos a expressão da velocidade na direção x em função de y

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (y^2 - by) + U \frac{y}{b} \quad (4)$$

A velocidade média ($\bar{u}$) de escoamento do fluido entre os discos pode agora ser obtida, através da seguinte fórmula (sendo S a área da secção transversal do conduto)

$$\bar{u} = \frac{1}{S} \int_S u dS = \frac{1}{b} \int_0^b u dy$$

Calculando a integral acima, com a aplicação da equação (4), resulta a seguinte expressão para a velocidade média.

$$\bar{u} = \frac{U}{2} - \frac{b^2}{12\mu} \frac{dp}{dx} \quad (5)$$

Façamos agora um balanço de forças sobre o elemento fluídico de largura unitária representado na Figura, sendo τ' e τ'' as tensões de cisalhamento junto às placas móvel e estacionária, respectivamente. Não havendo acelerações no escoamento, e assumindo os sentidos de τ' e τ'' como sendo os representados na Figura, temos

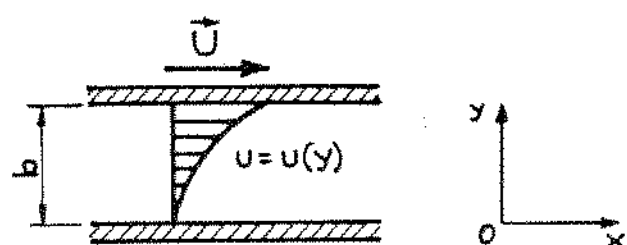
$$\tau' dx + p b = \tau'' dx + (p + dp) b$$

ou

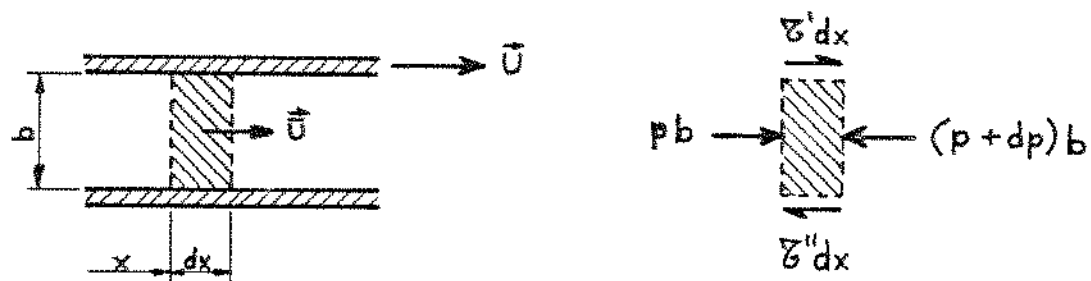
$$\frac{\tau' - \tau''}{b} = \frac{dp}{dx} \quad (6)$$

A união das equações (5) e (6) fornece finalmente

$$\nabla' - \nabla'' = \frac{12\mu}{b} \left(\frac{U}{2} - \bar{u} \right)$$



Representação do escoamento entre as placas.



Representação do elemento fluido (esquerda) e das forças atuantes sobre este (direita).

ANEXO E - PROGRAMA DE COMPUTADOR

1. INTRODUÇÃO

O Capítulo 4 tratou do desenvolvimento de um modelo matemático destinado a calcular teoricamente o escoamento de um fluido que se movimenta entre dois discos dispostos paralelamente entre si, sendo um disco rotativo e o outro estacionário. Algumas idealizações estrategicamente assumidas levaram-nos à obtenção de uma série de equações escritas para um espaço bidimensional, representando de uma forma aproximada o escoamento real que queremos analisar.

Uma rápida revisão do referido modelo matemático é o suficiente para percebermos a conveniência de resolvê-lo através do emprego de métodos computacionais, devido às não-linearidades e outras complexidades matemáticas envolvidas. Faz-se necessário então o emprego de um programa de computador que resolva convenientemente tal sistema de equações.

Este Anexo trata exatamente do desenvolvimento deste programa computacional, sendo que os resultados obtidos com o mesmo são apresentados no Capítulo 5.

2. DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA

O programa computacional foi desenvolvido na linguagem BASIC, em um microcomputador "Spectrum - Micro Engenho 2" compatível com a linha "Apple" e contando com 128 kbytes de memória RAM. Para a sua utilização, o programa requer a seguinte configuração mínima de periféricos: teclado, monitor de vídeo de 40 colunas, acionador de disco e impressora de 80 colunas.

Uma vez que o programa já esteja corretamente armazenado em um disco magnético, sob a forma de um arquivo chamado "MODELO MATEMÁTICO", a sua utilização deverá então obedecer à sequência descrita abaixo.

1. Lixe o disco corretamente posicionado em seu acionador e ligue o microcomputador e seus periféricos.

2. Carregue o programa armazenado no disco e inicie a sua execução, com o seguinte comando introduzido pelo teclado

RUN MODELO MATEMÁTICO

3. O programa começará a requisitar através do monitor de vídeo a entrada de dados, os quais deverão ser introduzidos pelo teclado e visualizados pelo próprio monitor, ao mesmo tempo em que serão automaticamente impressos. A introdução se dará linha por linha, sendo que dois dados de uma mesma linha deverão ser separados por uma vírgula. Cada linha de dados deverá ser introduzida tecla tecla **ENTER**.

4. Após a introdução da última linha de dados, os cálculos começarão imediatamente a ser realizados pelo computador. Ao fim deste processo, o programa irá automaticamente ativar o modo de impressão em 80 colunas (desativando o monitor de vídeo) e será iniciada então a impressão dos resultados obtidos.

5. Finda a impressão dos resultados, o programa automaticamente reativará o monitor de vídeo.

6. Para uma nova utilização do programa, digite o comando RUN e volte ao passo no. 3.

3. DADOS DE ENTRADA

Vamos comentar agora o conteúdo de cada linha de dados do programa MODELO MATEMÁTICO, na mesma ordem em que estas aparecem. De acordo com a mensagem autoexplicativa fornecida pelo próprio computador, as unidades de medida não especificadas serão subentendidas como pertencentes ao Sistema Internacional (SI).

1. R0, RN ?

Solicita os valores do raio interno (ri) e do raio externo (re) dos discos.

2. B, E ?

Solicita os valores do espaçamento entre os discos (b) e da rugosidade absoluta (E) destes.

3. VISC, DENS ?

Solicita os valores da viscosidade dinâmica (μ) e da densidade (ρ) do fluido.

4. ROT (rpm), Q (l/min) ?

Solicita os valores do número de rotações por minuto do rotor e da vazão que atravessa a bomba (em litros por minuto).

5. NÚMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ?

Solicita o valor (inicial) de N (vide item 5).

6. DESEJA ESTIMAR PRECISÕES (S OU N) ?

Solicita uma resposta positiva (S) ou negativa (N) sobre o desejo de serem estipuladas as precisões a serem alcançadas na resolução do modelo matemático.

7. PRECISÕES RELATIVAS : EV, EP ?

Caso a resposta dada na linha anterior seja positiva (S), esta linha vem então solicitar os valores das precisões (desvios) relativas (vide item 5) estipulados para a velocidade tangencial e para a pressão na secção de descarga da bomba.

4. RESULTADOS FORNECIDOS

Após ter realizado todos os cálculos necessários, o programa começará então a imprimir automaticamente os resultados obtidos. Aqui também as unidades de medida não especificadas serão subentendidas como pertencentes ao SI.

Como será comentado mais detalhadamente no item 5, o programa dividirá o intervalo entre o raio interno e o raio externo dos discos em N subintervalos iguais, realizando portanto os cálculos para as N + 1 posições assim definidas ao longo da direcção radial.

O programa imprimirá inicialmente uma tabela contendo os valores de importantes variáveis calculadas para cada uma dessas N + 1 posições radiais. Esta tabela tem a função de permitir o acompanhamento do escoamento do fluido através de toda a bomba. Cada linha da tabela representa uma posição radial diferente, sendo os conteúdos das colunas comentados abaixo na ordem em que aparecem na impressão (da esquerda para a direita).

1. F 1.

Fornece o número de ordem para cada linha, desde 0 até $N+1$.

2. RAIO

Fornece o valor do raio (r) correspondente a cada linha.

3. VEL. RADIAL

Fornece o valor calculado da velocidade radial (u) para cada posição radial da bomba.

4. VEL. TANG.

Fornece o valor calculado da velocidade tangencial (v) para cada posição radial da bomba.

5. PRESSÃO

Fornece o valor calculado da diferença de pressão (Δp) entre cada posição radial e a secção de entrada (sucção) da bomba.

6. ALT. MAN. (mmHg)

Fornece o valor calculado da altura manométrica (H_m) para cada posição radial da bomba, em milímetros de mercúrio.

Finda a impressão da tabela, o programa passará então a imprimir os valores calculados de um grupo de grandezas importantes para uma análise mais completa do desempenho da bomba. Tais grandezas são comentadas abaixo na ordem em que são impressas.

1. POT. ROTOR =

Apresenta o valor calculado da potência total fornecida pelo rotor ao fluido (P_R).

2. POT. LIQ. =

POT. UTIL =

Apresenta valores da potência útil (P_u) ganha pelo fluido, calculados através das equações (31) e (13) do Capítulo 4, respectivamente. Note que tais valores deveriam ser teoricamente coincidentes entre si, e uma comparação entre os mesmos implica numa verificação da validade dos cálculos realizados.

3. RENDIMENTO =

Apresenta o valor calculado do rendimento (η) da bomba, apenas se este for positivo.

4. REYNOLDS MAX. =

EM I =

Apresenta o máximo valor calculado do número de Reynolds (Re) entre as $N+1$ posições radiais da bomba, e o número de ordem (I) da posição relativa a este valor.

5. TAL MAX. =

EM I =

Apresenta o máximo valor calculado de tensão de cisalhamento (τ_1 ou τ_2) entre as $N+1$ posições radiais de cada disco, e o número de ordem (I) da posição relativa a este valor.

6. RENDIMENTO MAX. =

EM I =

Apresenta o máximo valor calculado do rendimento ($\underline{Q}$) entre as $N+1$ posições radiais da bomba, e o número de ordem ($\underline{I}$) da posição relativa a este valor, somente se este rendimento for positivo. Isto significa que, para cada posição radial, o programa calcula internamente um valor fictício de rendimento imaginando que esta seja a secção de descarga da bomba.

7. N =

H =

A impressão termina com a apresentação dos valores do número de subintervalos ($\underline{N}$) utilizado pelo programa e do tamanho ($\underline{H}$) de cada um destes subintervalos.

5. MÉTODOS DE CÁLCULO

O item 4.4.4 apresentou um roteiro que define claramente quais equações entre aquelas deduzidas no Capítulo 4 devem ser utilizadas para a obtenção dos resultados teóricos desejados. Notamos que algumas dessas equações são casos típicos de equações diferenciais e de integrações que não podem ser resolvidas exatamente por métodos analíticos convencionais. O programa MODELO MATEMÁTICO emprega então métodos numéricos aproximados para a resolução de tais equações.

A equação (7) do Capítulo 4 pode ser escrita genericamente sob a seguinte forma para o cálculo de $\underline{v}$

$$\frac{dv}{dr} = f(r, v) \quad \text{com} \quad r_i \leq r \leq r_e \\ v(r_i) = 0$$

onde $\underline{f(r, v)}$ é uma função conhecida das variáveis $\underline{r}$ e $\underline{v}$.

O programa resolve numericamente esta equação diferencial através do Método de Runge-Kutta de Quarta Ordem [47]. De acordo com este método, o intervalo $[r_i, r_e]$ é dividido em um número $\underline{N}$ de subintervalos de iguais dimensões, sendo o valor de $\underline{v}$ calculado aproximadamente para cada um dos $N+1$ pontos desta divisão. Conhecidos $\underline{r}$ e $\underline{v}$ para um determinado ponto, o valor da função $\underline{f(r, v)}$ é calculado através de uma subrotina apropriada que resolve diretamente uma série de equações citadas no item 4.4.4.

A equação (6) do Capítulo 4 pode ser escrita genericamente sob a seguinte forma para o cálculo de $\underline{p}$

$$\frac{dp}{dr} = g(r) \quad \text{com} \quad r_i \leq r \leq r_e \\ p(r_i) = 0$$

onde $\underline{g(r)}$ é uma função conhecida da variável $\underline{r}$. Portanto, integrando-se os dois lados da igualdade acima

$$p = p(r) = \int_{r_i}^r g(r) dr$$

O programa realiza numericamente esta integração através da Regra de Simpson [47]. De acordo com esta regra, o intervalo $[r_i, r_e]$ é dividido em um número par ($\underline{N}$) de subintervalos iguais, sendo o valor de $\underline{p}$ calculado para pontos alternados entre os $\underline{N+1}$ pontos desta divisão. Os valores da função $\underline{g(r)}$ são calculados através de uma subrotina apropriada.

Os valores da potência útil ($\underline{Pu}$) e da potência do rotor ($\underline{Pr}$) também são calculados pelo programa com o auxílio da Regra de Simpson, através da integração numérica das equações (13) e (14) do Capítulo 4.

Uma escolha adequada do número de subintervalos ($\underline{N}$) é de fundamental importância para um bom desempenho dos métodos numéricos utilizados pelo programa, tendo influência direta sobre os valores dos erros cometidos por tais métodos. Como regra geral, podemos dizer que um maior valor de $\underline{N}$ implica num menor erro de truncamento (erro inerente ao próprio método numérico aproximado), tendo como contrapartidas um maior tempo de processamento do programa e um aumento no erro de arredondamento cometido pelo computador. Assim, a escolha do valor de $\underline{N}$ deverá ser uma solução de compromisso entre tendências mutuamente conflitantes [47].

Razões de ordem prática levaram-nos a desenvolver o programa MODELO MATEMÁTICO utilizando a mesma divisão do intervalo $[r_i, r_e]$ em $\underline{N}$ subintervalos iguais para todos os procedimentos numéricos envolvidos.

O valor de N deveria ser idealmente definido em função da precisão que se deseja atingir para cada aplicação de um determinado método numérico. Como o Método de Runge-Kutta não possui a propriedade de fornecer uma estimativa da precisão alcançada, e como o cálculo do erro de truncamento cometido pela Regra de Simpson seria um procedimento extremamente trabalhoso para as funções com que estamos lidando, fizemos o programa MODELO MATEMÁTICO prever as duas opções descritas abaixo para a definição do valor de N, para cada nova utilização do programa:

1. Definição do valor de N (par) pelo usuário do programa, em função de experiências ou tentativas anteriores, sendo tal valor fornecido como um dos dados de entrada.
2. Determinação do valor de N (par) pelo próprio programa, através de um processo iterativo que procura estimar os erros cometidos pelos métodos numéricos na resolução das equações (6) e (7) do Capítulo 4.

Nesta segunda opção, o usuário deverá fornecer como dados de entrada do programa um valor inicial para N (determinado de acordo com o bom senso e experiências anteriores) e os valores máximos admissíveis (EV e EP) dos desvios relativos a serem cometidos pelo programa no cálculo dos valores de v e p na secção de descarga da bomba.

Partindo de uma divisão do intervalo $[r_i, r_e]$ em N subintervalos, o programa calcula os valores da velocidade tangencial (v) e da pressão (p) na posição radial externa (re) da bomba. O programa duplica então o valor de N, repetindo a seguir os mesmos passos executados anteriormente. Se os desvios relativos entre os resultados obtidos com N e com 2N subintervalos forem menores ou iguais a EV e EP, então o procedimento termina e os resultados do programa serão assumidos como sendo aqueles obtidos na última iteração; em caso contrário, o programa duplica novamente o valor do número de subintervalos e passa a repetir o mesmo procedimento descrito acima.

Matematicamente, o processo iterativo terminará quando

$$\left| \frac{v^{2N} - v^N}{v^{2N}} \right| \leq EV \quad e \quad \left| \frac{p^{2N} - p^N}{p^{2N}} \right| \leq EP$$

sendo os valores envolvidos de $\underline{v}$ e $\underline{p}$ tomados no raio externo da bomba, calculados com $\underline{N}$ e com $\underline{2N}$ subintervalos.

6. LISTAGEM DO PROGRAMA

É apresentada a seguir uma listagem completa de todas as linhas do programa computacional MODELO MATEMATICO. É fornecida também posteriormente uma relação de todas as variáveis utilizadas no programa, para um melhor entendimento deste.

```

10 REM *MODELO MATEMATICO*
20 PRINT CHR$(4)"PR#1"
30 E$ = CHR$(27)
40 PRINT : PRINT E$"--" CHR$(1); "CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISC
    OS - UM DISCO ROTATIVO": PRINT
50 PRINT "DADOS INICIAIS"; E$"--" CHR$(0)
60 PRINT "UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI": PRINT
70 INPUT "RO,RN ? "; RO,RN
80 INPUT "B,E ? "; B,E
90 INPUT "VISC,DENS ? "; VI,D
100 INPUT "ROT(rpm),Q(l/min) ? "; W,Q
110 INPUT "NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? "; M
120 INPUT "DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? "; R$
130 IF R$ = "N" THEN 150
140 INPUT "PRECISOES RELATIVAS: EV,EF ? "; EV,EF
150 PRINT CHR$(9)"80N"
160 PRINT E$"--" CHR$(1); "RESULTADOS": PRINT
170 PRINT "PT."; TAB(2); "RAIO","VEL. RADIAL","VEL. TANG.","PRESSAO","A
    LT. MAN. (mmHg)"
180 PI = 3.14159265
190 W = W * PI / 30; Q = Q / 6E4
200 N = M: RF = RO: VF = 0
210 GOSUB 740: GOSUB 870: GOSUB 900
220 RM = RE
230 FA = FV: FB = FP: UO = U: SR = FR: SU = FU
240 IF R$ = "S" THEN 270
250 PRINT E$"--" CHR$(0)
260 PRINT 0; TAB(4); RO,UO,0,0,0
270 H = (RN - RO) / N: R = RO: V = 0: FV = FA: FP = FB
280 S = FP: P = 0
290 FOR I = 1 TO N
300 K1 = H * FV
310 RF = R + H / 2: VF = V + K1 / 2: GOSUB 740
320 K2 = H * FV
330 VF = V + K2 / 2: GOSUB 740
340 K3 = H * FV
350 RF = R + H: VF = V + K3: GOSUB 740
360 K4 = H * FV
370 R = RF: V = V + (K1 + 2 * K2 + 2 * K3 + K4) / 6
380 VF = V: GOSUB 740: GOSUB 870
390 IF I / 2 - INT(I / 2) = 0 THEN 410
400 S = S + 4 * FP: P$ = "--": GOTO 420
410 P = P + H * (S + FP) / 3: P$ = STR$(P): S = FP
420 IF R$ = "S" THEN 560
430 GOSUB 900
440 IF I / 2 - INT(I / 2) = 0 THEN 460
450 SR = SR + 4 * FR: SU = SU + 4 * FU: H$ = "--": GOTO 520
460 PR = PR + H * (SR + FR) / 3: SR = FR
470 PU = PU + H * (SU + FU) / 3: SU = FU
480 HM = PU / Q / 13.6 / 9.8: H$ = STR$(HM)
490 IF PR = 0 THEN 520
500 IF PU / PR < RD THEN 520

```

```

510 RD = PU / PR:K = I
520 IF RE < RM THEN 540
530 RM = RE:L = I
540 I$ = STR$ (I)
550 PRINT I: TAB( 5 - LEN (I$)):R,U,V,P$,H$
560 NEXT I
570 IF R$ = "N" THEN 620
580 IF M = N THEN 600
590 IF ABS (V - VA) < = V * EV AND ABS (P - PA) < = ABS (P * EP) THEN
610
600 N = 2 * N:VA = V:PA = P: GOTO 240
610 R$ = "N": GOTO 240
620 PL = Q * (P + D / 2 * (V2 ^ 2 - U0 ^ 2))
630 PRINT : PRINT "POT. ROTOR = ";PR
640 PRINT "POT. LIQ. = ";PL:" POT. UTIL = ";PU
650 IF PU < = 0 THEN 670
660 PRINT "RENDIMENTO = ";PU / PR
670 PRINT "REYNOLDS MAX. = ";RM;" EM I=";L
680 PRINT "TAL MAX. = ";TM;" EM I=";I
690 IF RD < = 0 THEN 710
700 PRINT "RENDIMENTO MAX. = ";RD;" EM I=";K
710 PRINT : PRINT "N=";N;" H=";H
720 PRINT : PRINT CHR$ (4)"PR#0"
730 END
740 REM SUBROTINA
750 U = Q / 2 / PI / RF / B
760 VR = (U ^ 2 + (W * RF / 2 - VF) ^ 2) ^ .5
770 RE = 4 * D * VR * B / 3 / VI
780 IF RE > 1000 THEN 800
790 F = 64 / RE: GOTO 830
800 AF = (2.457 * LOG (1 / ((7 / RE) ^ .9 + .27 * E / 2 / B))) ^ 16
810 BF = (37530 / RE) ^ 16
820 F = 8 * ((8 / RE) ^ 12 + 1 / (AF + BF) ^ 1.5) ^ (1 / 12)
830 TAL = D * F * VR ^ 2 / B
840 TR = 2 * TAL * U / VR:TT = 2 * TAL * (W * RF / 2 - VF) / VR
850 FV = - VF / RF + TT / U / D / B
860 RETURN
870 REM SUBROTINA
880 FP = D * (U ^ 2 + VF ^ 2) / RF - TR / B
890 RETURN
900 REM SUBROTINA
910 V1 = (U ^ 2 + (W * RF - VF) ^ 2) ^ .5
920 V2 = (U ^ 2 + VF ^ 2) ^ .5
930 T1 = TAL * V1 / VR:T2 = TAL * V2 / VR
940 IF TM > T1 AND TM > T2 THEN 980
950 IF T1 < T2 THEN 970
960 TM = T1:J = I: GOTO 980
970 TM = T2:J = I
980 FR = 2 * PI * W * T1 * (W * RF - VF) * RF ^ 2 / V1
990 FU = 2 * PI * (VF * TT - U * TR) * RF
1000 RETURN

```

AF - variável auxiliar utilizada no cálculo do coeficiente de atrito.

B - espaçamento entre os discos.

BF - variável auxiliar utilizada no cálculo do coeficiente de atrito.

D - densidade do fluido.

E - rugosidade dos discos.

EP, EV - máximos desvios relativos (precisões) para a pressão e a velocidade tangencial calculadas na secção de descarga da bomba.

ES - variável auxiliar para operação de sublinhar linhas (impressão).

F - coeficiente de atrito.

FA - resultado do cálculo da subrotina da velocidade tangencial na secção de entrada da bomba.

FB - idem para a pressão.

FP - resultado do cálculo da subrotina da pressão.

FR - idem para a potência do rotor.

FU - idem para a potência útil.

FV - idem para a velocidade tangencial.

H - comprimento de cada subintervalo.

HM - altura manométrica.

H\$ - variável alfanumérica equivalente a HM.

I - número de ordem (contador).

I\$ - variável alfanumérica equivalente a I.

J - posição da máxima tensão de cisalhamento.

K - posição do máximo rendimento.

K1, K2, K3, K4 - termos do método de Runge-Kutta.

L - posição do máximo número de Reynolds.

M - número inicial de subintervalos.

N - número de subintervalos.

P - pressão.

PA - auxiliar no cálculo do desvio relativo da pressão.

PI - número π .

PL - potência líquida.

PR - potência do rotor.

PU - potência útil.

P\$ - variável alfanumérica equivalente a P.

Q - vazão.

R - raio.

RD - rendimento máximo.

RE - número de Reynolds.

RF - raio utilizado nas subrotinas.
RM - número de Reynolds máximo.
RN - raio externo dos discos.
R0 - raio interno dos discos.
RS - resposta 'S' ou 'N'.
S - variável auxiliar no cálculo da pressão.
SR - idem para a potência do rotor.
SU - idem para a potência útil.
TAL - tensão de cisalhamento média.
TM - tensão de cisalhamento máxima.
TR - valor de $(\tau_{tr} + \tau_{tr})$.
TI - valor de $(\tau_{to} + \tau_{to})$.
T1 - tensão de cisalhamento no disco 1.
T2 - tensão de cisalhamento no disco 2.
U - velocidade radial.
U0 - velocidade radial calculada na entrada da bomba (raio interno).
V - velocidade tangencial.
VA - auxiliar no cálculo do desvio relativo da velocidade tangencial.
VF - velocidade tangencial utilizada nas subrotinas.
VI - viscosidade.
VR - velocidade relativa média.
V1 - velocidade relativa ao disco 1.
V2 - velocidade relativa ao disco 2.
W - velocidade angular.

ANEXO B - LISTAGENS DOS RESULTADOS OBTIDOS EM COMPUTADOR

115

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3
 B, E ? 4E-3, 1E-4
 VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3
 ROT(rpm), Q(l/min) ? 700, .5
 NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 8
 DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? S
 PRECISOES RELATIVAS: EV, EP ? .01, .01

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.132629119	0	0	0
1	4.375E-03	.0757880683	5.56818584E-03	-	-
2	6.25E-03	.0530516478	.0171985103	7.81276159	-5.2707362E-03
3	8.125E-03	.0408089598	.0370361753	-	-
4	.01	.0331572798	.066352734	9.07748125	.0139538355
5	.011875	.0279219199	.105634696	-	-
6	.01375	.0241143853	.15465857	13.0889454	.121714267
7	.015625	.0212206591	.212621133	-	-
8	.0175	.018947017	.278309694	25.0549561	.429476716
9	.019375	.0171134348	.350284844	-	-
10	.02125	.0156034258	.427049639	51.0437561	1.05298878
11	.023125	.0143382832	.50718623	-	-
12	.025	.0132629119	.589450218	96.5459411	2.0691397
13	.026875	.0123375925	.672821745	-	-
14	.02875	.0115329669	.756519102	165.360443	3.50480497
15	.030625	.0108268669	.839984406	-	-
16	.0325	.0102022399	.922851956	259.44946	5.35289658
17	.034375	9.64575413E-03	1.00490909	-	-
18	.03625	9.14683582E-03	1.08605625	379.423741	7.59369975
19	.038125	8.69699143E-03	1.16627201	-	-
20	.04	8.28931996E-03	1.24558431	525.144591	10.2080537
21	.041875	7.91815638E-03	1.32404909	-	-
22	.04375	7.57880682E-03	1.40173536	696.163672	13.1816248
23	.045625	7.267349E-03	1.4787156	-	-
24	.0475	6.98047997E-03	1.55506008	891.961495	16.5045713
25	.049375	6.71539845E-03	1.63083391	-	-
26	.05125	6.46971314E-03	1.70609585	1112.0478	20.1700747
27	.053125	6.24137032E-03	1.78089814	-	-
28	.055	6.02859633E-03	1.8552868	1355.99171	24.1731548
29	.056875	5.8298514E-03	1.92930226	-	-
30	.05875	5.64379231E-03	2.00298004	1623.42354	28.5099693
31	.060625	5.46924203E-03	2.07635137	-	-
32	.0625	5.30516477E-03	2.14944379	1914.02785	33.1774384

POT. ROTOR = .431104486
 POT. LIQ. = .036853463 POT. UTIL = .0368490749
 RENDIMENTO = .0854759717
 REYNOLDS MAX. = 528.421552 EM I=8
 TAL MAX. = 14.5923077 EM I=32
 RENDIMENTO MAX. = .138626945 EM I=14

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS
UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
B,E ? 4E-3,1E-4
VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
ROT(rpm),Q(l/min) ? 700,1
NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.265258239	0	0	0
1	4.375E-03	.151576136	2.81431773E-03	-	-
2	6.25E-03	.106103296	8.81878625E-03	32.8913707	-.0133317941
3	8.125E-03	.0816179197	.0193386217	-	-
4	.01	.0663145597	.0354103608	35.9361388	-.01389264
5	.011875	.0558438397	.0578084753	-	-
6	.01375	.0482287707	.0870371539	37.6606054	.0184111786
7	.015625	.0424413182	.123330968	-	-
8	.0175	.0378940341	.166669461	41.7755306	.126252331
9	.019375	.0342268695	.216804625	-	-
10	.02125	.0312068516	.273298353	51.727991	.390860982
11	.023125	.0286765663	.335566166	-	-
12	.025	.0265258239	.402923394	71.639555	.897577255
13	.026875	.024675185	.474630271	-	-
14	.02875	.0230659338	.549933	105.8869	1.72662838
15	.030625	.0216537338	.628098641	-	-
16	.0325	.0204044799	.708442542	158.49579	2.93651272
17	.034375	.0192915083	.790347863	-	-
18	.03625	.0182936716	.873277457	232.693031	4.55900936
19	.038125	.0173939829	.956778934	-	-
20	.04	.0165786399	1.04048407	330.730256	6.60283706
21	.041875	.0158363128	1.1241039	-	-
22	.04375	.0151576136	1.2074209	453.944674	9.06161796
23	.045625	.014534698	1.29027943	-	-
24	.0475	.0139609599	1.37257555	602.954253	11.9218797
25	.049375	.0134307969	1.454247	-	-
26	.05125	.0129394263	1.53526391	777.886827	15.1687567
27	.053125	.0124827406	1.61562065	-	-
28	.055	.0120571927	1.69532889	978.579272	18.7889946
29	.056875	.0116597028	1.77441204	-	-
30	.05875	.0112875846	1.85290079	1204.72201	22.7719365
31	.060625	.0109384841	1.93082985	-	-
32	.0625	.0106103295	2.0082355	1455.9503	27.1094055

POT. ROTOR = .469952069
POT. LIO. = .0602609127 POT. UTIL = .0602190261
RENDIMENTO = .128138655
REYNOLDS MAX. = 747.099509 EM I=12
TAL MAX. = 15.439654 EM I=32
RENDIMENTO MAX. = .158504082 EM I=20

W=37 H=1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS
UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
B,E ? 4E-3,1E-4
VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
ROT(rpm),Q(l/min) ? 700,1.5
NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.397887358	0	0	0
1	4.375E-03	.227364205	1.88300515E-03	-	-
2	6.25E-03	.159154943	5.92923436E-03	75.3562943	-.0204400923
3	8.125E-03	.122426879	.0130829399	-	-
4	.01	.0994718395	.0241374683	82.5160298	-.0279698918
5	.011875	.0837657596	.0397561204	-	-
6	.01375	.072343156	.0604643113	84.6926727	-.0181547625
7	.015625	.0636619773	.0866423954	-	-
8	.0175	.0568410511	.118523408	87.1020761	.0342226287
9	.019375	.0513403043	.156196414	-	-
10	.02125	.0468102774	.199615153	92.3450639	.174797923
11	.023125	.0430148495	.248611246	-	-
12	.025	.0397887358	.302910943	103.252516	.466407095
13	.026875	.0370127775	.362154287	-	-
14	.02875	.0345989007	.425915547	123.143249	.980650369
15	.030625	.0324806006	.493723788	-	-
16	.0325	.0306067198	.565082613	155.601097	1.78706301
17	.034375	.0289372624	.639488247	-	-
18	.03625	.0274405074	.716445356	204.13339	2.94363843
19	.038125	.0260909743	.795480193	-	-
20	.04	.0248679599	.876150882	271.862064	4.49131136
21	.041875	.0237544691	.958054825	-	-
22	.04375	.0227364205	1.04083338	361.32287	6.45303473
23	.045625	.021802047	1.12417412	-	-
24	.0475	.0209414399	1.20781089	474.391423	8.83642831
25	.049375	.0201461953	1.29152234	-	-
26	.05125	.0194091394	1.37512894	612.315285	11.6382324
27	.053125	.018724111	1.4584893	-	-
28	.055	.018085789	1.54149582	775.812767	14.8489258
29	.056875	.0174895542	1.62407014	-	-
30	.05875	.0169313769	1.70615864	965.198617	18.4564678
31	.060625	.0164077261	1.7877281	-	-
32	.0625	.0159154943	1.86876173	1180.50684	22.4487841

POT. ROTOR = .503032089
POT. LIQ. = .0749412736 POT. UTIL = .0747993485
RENDIMENTO = .148696972
REYNOLDS MAX. = 914.98887 EM I=15
(AL MAX. = 16.2766455 EM I=32
RENDIMENTO MAX. = .158229682 EM I=26

I=32 H=1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3

B, E ? 4E-3, 1E-4

VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3

ROT(rpm), Q(l/min) ? 1000, .5

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 8

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? S

PRECISOES RELATIVAS: EV, EP ? .01, .01

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	FRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.132629119	0	0	0
1	4.375E-03	.0757880683	7.9545512E-03	-	-
2	6.25E-03	.0530516478	.0245693004	7.86641824	-3.59894662E-03
3	8.125E-03	.0408089598	.0329088219	-	-
4	.01	.0331572798	.0947896199	9.95568685	.0392873273
5	.011875	.0279219199	.150906709	-	-
6	.01375	.0241143853	.220940814	18.1779292	.261680535
7	.015625	.0212206591	.303744476	-	-
8	.0175	.018947017	.397585277	42.721773	.891640564
9	.019375	.0171134348	.50040692	-	-
10	.02125	.0156034258	.610070912	95.895615	2.16562239
11	.023125	.0143382832	.724551758	-	-
12	.025	.0132629119	.842071739	188.887149	4.24066223
13	.026875	.0123375925	.96117392	-	-
14	.02875	.0115329669	1.08074157	329.445274	7.17167702
15	.030625	.0108268669	1.19997772	-	-
16	.0325	.0102022399	1.31835998	521.5742	10.9442449
17	.034375	9.64575413E-03	1.43558442	-	-
18	.03625	9.14683582E-03	1.55150893	766.521145	15.5181609
19	.038125	8.69699143E-03	1.66610287	-	-
20	.04	8.28931996E-03	1.77940615	1064.00407	20.8543419
21	.041875	7.91815638E-03	1.8914987	-	-
22	.04375	7.57880682E-03	2.00247909	1413.10898	26.9235504
23	.045625	7.267349E-03	2.11245086	-	-
24	.0475	6.98047997E-03	2.22151439	1812.77658	33.7057127
25	.049375	6.71539845E-03	2.32976272	-	-
26	.05125	6.46971314E-03	2.43727979	2262.00708	41.1869221
27	.053125	6.24137032E-03	2.5441402	-	-
28	.055	6.02859633E-03	2.65040971	2759.92178	49.3570218
29	.056875	5.8298514E-03	2.75614608	-	-
30	.05875	5.64379231E-03	2.86140005	3305.76676	58.2081761
31	.060625	5.46924203E-03	2.96621624	-	-
32	.0625	5.30516477E-03	3.07063398	3898.89873	67.7341038

POT. ROTOR = .879805074

POT. LIG. = .0752334956 POT. UTIL = .0752300113

RENDIMENTO = .0835075898

REYNOLDS MAX. = 754.365025 EM l=8

VAL. MAX. = 20.8461286 EM l=32

RENDIMENTO MAX. = .159048621 EM l=14

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

119

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
B,E ? 4E-3,1E-4
VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
ROT(rpm),Q(l/min) ? 1000,1
NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT. RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN.(mmHg)
0	2.5E-03	.265258239	0	0
1	4.375E-03	.151576136	4.0204539E-03	-
2	6.25E-03	.106103296	.0125982661	32.9053284
3	8.125E-03	.0816179197	.0276266024	-
4	.01	.0663145597	.0505862298	36.178375
5	.011875	.0558438397	.0825835362	-
6	.01375	.0482287707	.124338791	39.1805593
7	.015625	.0424413182	.176187098	-
8	.0175	.0378940341	.238099229	47.5726478
9	.019375	.0342268695	.309720893	-
10	.02125	.0312068516	.390426219	68.0236585
11	.023125	.0286765663	.479380238	-
12	.025	.0266258239	.575604848	108.842713
13	.026875	.024675185	.678043243	-
14	.02875	.0230659338	.78561857	178.927317
15	.030625	.0216537338	.897283772	-
16	.0325	.0204044799	1.01206077	286.480635
17	.034375	.0192915083	1.12906837	-
18	.03625	.0182936716	1.24753922	438.083352
19	.038125	.0173939829	1.36682705	-
20	.04	.0165786399	1.48640581	638.32923
21	.041875	.0158363128	1.60586271	-
22	.04375	.0151576136	1.724887	889.9472
23	.045625	.014534698	1.84325633	-
24	.0475	.0139609599	1.96082222	1194.1989
25	.049375	.0134307969	2.07749572	-
26	.05125	.0129394263	2.19323416	1551.34591
27	.053125	.0124827406	2.3080295	-
28	.055	.0120571927	2.42189842	1961.05604
29	.056875	.0116597028	2.53487434	-
30	.05875	.0112875846	2.64700113	2422.69822
31	.060625	.0109384841	2.75832835	-
32	.0625	.0106103295	2.86890786	2935.52872

POT. ROTOR = .959085855
POT. LIQ. = .123048957 POT. UTIL = .123007242
RENDIMENTO = .128254672
REYNOLDS MAX. = 1066.56011 EM I=12
TAL MAX. = 22.0565529 EM I=32
RENDIMENTO MAX. = .159011738 EM I=20

N=32 H=1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3

B,E ? 4E-3,1E-4

VISC,DENS ? 4E-3,1.07E3

ROT(rpm),Q(l/min) ? 1000,1.5

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT. RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.397887358	0	0
1	4.375E-03	.227364205	2.69000734E-03	-
2	6.25E-03	.159154943	8.4703348E-03	75.3625813
3	8.125E-03	.122426879	.0186899141	-
4	.01	.0994718395	.0344820976	82.6273647
5	.011875	.0837657596	.0567944577	-
6	.01375	.072343156	.0863775876	85.4113448
7	.015625	.0636619773	.123774851	-
8	.0175	.0568410511	.169319155	89.9410989
9	.019375	.0513403043	.223137734	-
10	.02125	.0468102774	.285164504	100.654251
11	.023125	.0430148493	.355158923	-
12	.025	.0397887358	.432729919	123.074189
13	.026875	.0370127775	.517363267	-
14	.02875	.0345989007	.608450781	163.882616
15	.030625	.0324806006	.705319697	-
16	.0325	.0306067198	.807260876	230.356257
17	.034375	.0289372624	.913554639	-
18	.03625	.0274405074	1.02349337	329.636665
19	.038125	.0260909743	1.13640028	-
20	.04	.0248679599	1.25164412	468.087867
21	.041875	.0237544691	1.36864975	-
22	.04375	.0227364205	1.48690483	650.881714
23	.045625	.021802047	1.60596302	-
24	.0475	.0209414399	1.72544413	881.844816
25	.049375	.0201461953	1.84503191	-
26	.05125	.0194091394	1.96446991	1163.52302
27	.053125	.018724111	2.08355614	-
28	.055	.018085789	2.20213688	1497.38254
29	.056875	.0174895542	2.32010019	-
30	.05875	.0169313769	2.43736948	1884.06621
31	.060625	.0164077261	2.55389728	-
32	.0625	.0159154943	2.66965961	2323.644

POT. ROTOR = 1.0265961

POT. LID. = .153044017 POT. UTIL = .15290209

RENDIMENTO = .148940845

REYNOLDS MAX. = 1306.23949 EM I=15

VAL MAX. = 23.2321466 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .158728189 EM I=24

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

121

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
B,E ? 4E-3,1E-4
VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
ROT(rpm),Q(l/min) ? 1000,2
NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN.(mmHg)
0	2.5E-03	.530516477	0	0	0
1	4.375E-03	.303152273	2.02116038E-03	-	-
2	6.25E-03	.212206591	6.37981881E-03	135.18507	-.0272869658
3	8.125E-03	.163235839	.0141212133	-	-
4	.01	.132629119	.0261530819	148.475584	-.0378059475
5	.011875	.111687679	.0432714913	-	-
6	.01375	.0964575413	.0661535319	152.423294	-.0270133121
7	.015625	.0848826364	.0953482083	-	-
8	.0175	.0757880682	.131270194	155.878006	.0369107839
9	.019375	.068453739	.174197508	-	-
10	.02125	.0624137032	.224273266	162.664177	.215478702
11	.023125	.0573531327	.281511293	-	-
12	.025	.0530516477	.345805177	176.816307	.600342468
13	.026875	.04935037	.416940183	-	-
14	.02875	.0461318676	.494607398	203.316164	1.30792553
15	.030625	.0433074675	.578419371	-	-
16	.0325	.0408089598	.667926582	247.998682	2.46519693
17	.034375	.0385830165	.762634042	-	-
18	.03625	.0365873433	.86201743	317.164284	4.19706551
19	.038125	.0347879657	.965538237	-	-
20	.04	.0331572798	1.0726575	417.097665	6.6122875
21	.041875	.0316726255	1.18284784	-	-
22	.04375	.0303152273	1.29560352	553.6213	9.79492384
23	.045625	.029069396	1.41044855	-	-
24	.0475	.0279219199	1.5269428	731.76434	13.8010252
25	.049375	.0268615938	1.64468611	-	-
26	.05125	.0258788525	1.7633207	955.580429	18.6601746
27	.053125	.0249654813	1.88253202	-	-
28	.055	.0241143853	2.00204821	1228.10805	24.3803025
29	.056875	.0233194036	2.12163854	-	-
30	.05875	.0225751692	2.24111093	1551.44138	30.9539241
31	.060625	.0218769681	2.36030892	-	-
32	.0625	.0212206591	2.47910824	1926.86966	38.3642583

POT. ROTOR = 1.08329532
POT. LIQ. = .17077613 POT. UTIL = .170439611
RENDIMENTO = .157334393
REYNOLDS MAX. = 1508.4933 EM I=17
TAL MAX. = 24.3955909 EM I=32
RENDIMENTO MAX. = .158774175 EM I=30

N=32 H=1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
 B,E ? 4E-3,1E-4
 VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
 ROT(rpm),Q(l/min) ? 1500,.5
 NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 8
 DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? S
 PRECISOES RELATIVAS: EV,EP ? .01,.01

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN.(mmHg)
0	2.5E-03	.132629119	0	0	0
1	4.375E-03	.0757880683	.0119318268	-	-
2	6.25E-03	.0530516478	.0368539506	7.99792964	4.98576884E-04
3	8.125E-03	.0408089598	.0793632328	-	-
4	.01	.0331572798	.14218443	12.1081516	.101379219
5	.011875	.0279219199	.226360063	-	-
6	.01375	.0241143853	.331411221	30.6509289	.604735113
7	.015625	.0212208591	.455616714	-	-
8	.0175	.018947017	.596377915	86.022795	2.0243951
9	.019375	.0171134348	.750610381	-	-
10	.02125	.0156034258	.915106368	205.826642	4.89266556
11	.023125	.0143382832	1.08682764	-	-
12	.025	.0132629119	1.26310761	415.213641	9.56302139
13	.026875	.0123375925	1.44176088	-	-
14	.02875	.0115329669	1.62111236	731.613977	16.1591085
15	.030625	.0108268669	1.79996659	-	-
16	.0325	.0102022399	1.97753997	1164.0368	24.6485301
17	.034375	9.64575413E-03	2.15337662	-	-
18	.03625	9.14683582E-03	2.32726339	1715.28929	34.9408598
19	.038125	8.69699143E-03	2.4991543	-	-
20	.04	8.28931996E-03	2.66910923	2384.73809	46.9481853
21	.041875	7.91815638E-03	2.83724805	-	-
22	.04375	7.57880682E-03	3.00371863	3170.32789	60.6047405
23	.045625	7.267349E-03	3.16867629	-	-
24	.0475	6.98047997E-03	3.33227159	4069.6763	75.8653729
25	.049375	6.71539845E-03	3.49464408	-	-
26	.05125	6.46971314E-03	3.65591969	5080.53473	92.6988031
27	.053125	6.24137032E-03	3.81621031	-	-
28	.055	6.02859633E-03	3.97561457	6200.92684	111.082186
29	.056875	5.8298514E-03	4.13421913	-	-
30	.05875	5.64379231E-03	4.29210008	7429.15701	130.997899
31	.060625	5.46924203E-03	4.44932436	-	-
32	.0625	5.30516477E-03	4.60595098	8763.77835	152.431813

POT. ROTOR = 1.97956142

POT. LID. = .169302203 POT. UTIL = .169300934

RENDIMENTO = .0855244664

REYNOLDS MAX. = 1131.12865 EM I=8

TAL MAX. = 31.2691726 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .159273699 EM I=14

Q=3E H=1.675E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3
 B, E ? 4E-3, 1E-4
 VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3
 ROT(rpm), Q(l/min) ? 1500, 1
 NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
 DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAID	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.265258239	0	0	0
1	4.375E-03	.151576136	6.03068086E-03	-	-
2	6.25E-03	.106103296	.0188973991	32.9395383	-.0118155478
3	8.125E-03	.0816179197	.0414399036	-	-
4	.01	.0663145597	.0758793446	36.7720913	.0108182351
5	.011875	.0558438397	.123875304	-	-
6	.01375	.0482287707	.186508187	42.9059365	.167048186
7	.015625	.0424413182	.264280646	-	-
8	.0175	.0378940341	.357148846	61.7812685	.684346369
9	.019375	.0342268695	.464581348	-	-
10	.02125	.0312068516	.585639363	107.964023	1.90979596
11	.023125	.0286765663	.719070439	-	-
12	.025	.0265258239	.863407414	200.026948	4.24526876
13	.026875	.024675185	1.01706505	-	-
14	.02875	.0230659338	1.17842805	357.948027	8.05963078
15	.030625	.0216537338	1.34592584	-	-
16	.0325	.0204044799	1.51809131	600.169125	13.6217958
17	.034375	.0192915083	1.69360268	-	-
18	.03625	.0182936716	1.87130892	941.491194	21.07789
19	.038125	.0173939829	2.05024064	-	-
20	.04	.0165786399	2.22960876	1392.2485	30.4680906
21	.041875	.0158363128	2.4087941	-	-
22	.04375	.0151576136	2.59733052	1958.58107	41.7632153
23	.045625	.014534698	2.76488451	-	-
24	.0475	.0139609599	2.94123334	2643.32818	54.901479
25	.049375	.0134307969	3.11624358	-	-
26	.05125	.0129394263	3.28985125	3447.07918	69.814682
27	.053125	.0124827406	3.46204425	-	-
28	.055	.0120571927	3.63284763	4369.08757	86.4420096
29	.056875	.0116597029	3.80231152	-	-
30	.05875	.0112875846	3.9705017	5407.93426	104.734565
31	.060625	.0109384841	4.13749253	-	-
32	.0625	.0106103295	4.30336179	6561.94666	124.654832

POT. ROTOR = 2.1579432
 POT. LIQ. = .276941227 POT. UTIL = .276899933
 RENDIMENTO = .128316599
 REYNOLDS MAX. = 1599.25926 EM I=12
 TAL MAX. = 33.0847528 EM I=32
 RENDIMENTO MAX. = .159282711 EM I=20

N=12 H=1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3

B, E ? 4E-3, 1E-4

VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3

ROT(rpm), Q(l/min) ? 1500, 1.5

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.397887358	0	0	0
1	4.375E-03	.227364205	4.03501104E-03	-	-
2	6.25E-03	.159154943	.0127055022	75.3779906	-.0197547557
3	8.125E-03	.122426879	.0280348711	-	-
4	.01	.0994718395	.0517231465	82.9002443	-.0165167217
5	.011875	.0837657596	.0851916866	-	-
6	.01375	.072343156	.129566381	87.172796	.0541655073
7	.015625	.0636619773	.185662277	-	-
8	.0175	.0568410511	.253978763	96.899489	.314069212
9	.019375	.0513403043	.334706952	-	-
10	.02125	.0468102774	.427749195	121.020002	.975191946
11	.023125	.0430148495	.532749668	-	-
12	.025	.0397887358	.649131708	171.659543	2.32749055
13	.026875	.0370127775	.776134037	-	-
14	.02875	.0345989007	.912843347	263.759207	4.70126963
15	.030625	.0324806006	1.05823252	-	-
16	.0325	.0306067198	1.21121185	413.675802	8.41650414
17	.034375	.0289372624	1.37068384	-	-
18	.03625	.0274405074	1.53558523	637.45137	13.738095
19	.038125	.0260909743	1.70491142	-	-
20	.04	.0248679599	1.87772959	949.35462	20.8532268
21	.041875	.0237544691	2.05318827	-	-
22	.04375	.0227364205	2.23052544	1360.99153	29.8680124
23	.045625	.021802047	2.40907424	-	-
24	.0475	.0209414399	2.58826474	1880.96818	40.8182208
25	.049375	.0201461953	2.76762185	-	-
26	.05125	.0194091394	2.94675987	2515.0197	53.689255
27	.053125	.018724111	3.12537472	-	-
28	.055	.018085789	3.30323489	3266.45294	68.4375353
29	.056875	.0174895542	3.48017169	-	-
30	.05875	.0169313769	3.65606957	4136.72054	85.007825
31	.060625	.0164077261	3.83085684	-	-
32	.0625	.0159154943	4.00449711	5125.98439	103.344702

POT. ROTOR = 2.3099374

POT. LIQ. = .34448649 POT. UTIL = .344344546

RENDIMENTO = .149070943

REYNOLDS MAX. = 1958.28076 EM I=15

TAL MAX. = 34.8780103 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .15904904 EM I=24

R=32 H=1.875E-03

IRUN

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS
UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
B,E ? 4E-3,1E-4
VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
ROT(rpm),Q(l/min) ? 1500,2
NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN.(mmHg)
0	2.5E-03	.530516477	0	0	0
1	4.375E-03	.303152273	3.03174057E-03	-	-
2	6.25E-03	.212206591	9.56972822E-03	135.193796	-.0270108459
3	8.125E-03	.163235839	.0211818199	-	-
4	.01	.132629119	.0392296229	148.6317	-.0331324513
5	.011875	.111687679	.0649072369	-	-
6	.01375	.0964575413	.0992302979	153.445776	3.03568638E-03
7	.015625	.0848826364	.143022317	-	-
8	.0175	.0757880682	.19690543	159.991935	.15586485
9	.019375	.068453739	.26129844	-	-
10	.02125	.0624137032	.336431647	174.967613	.5649558
11	.023125	.0573531327	.422413204	-	-
12	.025	.0530516477	.519396745	206.914485	1.44054383
13	.026875	.04935037	.62774062	-	-
14	.02875	.0461318676	.747729533	267.277215	3.07359842
15	.030625	.0433074675	.878851539	-	-
16	.0325	.0408089598	1.01956069	370.78425	5.81268003
17	.034375	.0385830165	1.16781548	-	-
18	.03625	.0365873433	1.32171599	533.238127	9.92296766
19	.038125	.0347879657	1.47982367	-	-
20	.04	.0331572798	1.64120068	768.189989	15.5556022
21	.041875	.0316726255	1.80531119	-	-
22	.04375	.0303152273	1.97187945	1086.43374	22.8281868
23	.045625	.029069396	2.14075039	-	-
24	.0475	.0279219199	2.31177681	1497.08839	31.8625293
25	.049375	.0268615938	2.48475005	-	-
26	.05125	.0258788525	2.65937966	2008.24513	42.763261
27	.053125	.0249654813	2.83531174	-	-
28	.055	.0241143853	3.0121652	2626.75816	55.5853098
29	.056875	.0233194056	3.18956721	-	-
30	.05875	.0225751692	3.36717803	3357.81522	70.3310084
31	.060625	.0218769681	3.54470416	-	-
32	.0625	.0212206591	3.72190242	4204.83955	86.9688253

POT. ROTOR = 2.45202787
POT. LIQ. = .386711329 POT. UTIL = .386373501
RENDIMENTO = .157573046
REYNOLDS MAX. = 2228.72507 EM I=16
TAL MAX. = 36.5739134 EM I=32
RENDIMENTO MAX. = .159246569 EM I=28

H=32 H=1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3

S, E ? 4E-3, 1E-4

VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3

ROT(rpm), Q(l/min) ? 1500, 2.5

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 16

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? S

PRECISOES RELATIVAS: EV, EF ? .02, .02

RESULTADOS

PT. RAID	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.663145597	0	0
1	4.375E-03	.378940341	2.42802995E-03	-
2	6.25E-03	.265258239	7.67537158E-03	212.37156
3	8.125E-03	.204044799	.0170208433	-
4	.01	.165786399	.0315964489	233.709985
5	.011875	.139609599	.0524216395	-
6	.01375	.120571927	.0803963919	240.210175
7	.015625	.106103295	.114290581	-
8	.0175	.0947350852	.160735284	245.72821
9	.019375	.0855671738	.214222338	-
10	.02125	.078017129	.277153432	256.259048
11	.023125	.0716914159	.350166847	-
12	.025	.0663145596	.435097492	278.428373
13	.026875	.0616879625	.534936324	-
14	.02875	.0576648345	.6507261	322.455913
15	.030625	.0541343344	.780422794	-
16	.0325	.0510111997	.920693817	404.126697
17	.034375	.0482287707	1.06835994	-
18	.03625	.0457341791	1.22092623	540.020413
19	.038125	.0434849571	1.37663071	-
20	.04	.0414465998	1.53431569	743.213322
21	.041875	.0395907819	1.69326747	-
22	.04375	.0378940341	1.85308005	1023.00621
23	.045625	.036336745	2.01385544	-
24	.0475	.0349023998	2.17463651	1386.12673
25	.049375	.0335769922	2.33636328	-
26	.05125	.0323485657	2.49884335	1837.90601
27	.053125	.0312068516	2.66222849	-
28	.055	.0301429817	2.8266905	2383.13502
29	.056875	.029149257	2.99239243	-
30	.05875	.0282189615	3.15945544	3026.60748
31	.060625	.0273462102	3.32792759	-
32	.0625	.0265258239	3.49776444	3773.26215

POT. ROTOR = 2.65708797

POT. LIQ. = .425070807 POT. UTIL = .424409812

RENDIMENTO = .159727347

REYNOLDS MAX. = 2372.78077 EM I=16

TAL MAX. = 38.0444417 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .159727347 EM I=32

I=32 R=1.375E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3

S, E ? 4E-3, 1E-4

VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3

ROT(rpm), Q(l/min) ? 1500, 3

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.795774716	0	0	0
1	4.375E-03	.454728409	2.02482566E-03	-	-
2	6.25E-03	.319309886	6.40706075E-03	306.907415	-.0410390148
3	8.125E-03	.244853759	.0142261518	-	-
4	.01	.198943679	.0264495769	338.068907	-.05849777948
5	.011875	.167531519	.043963493	-	-
6	.01375	.144686312	.0675683883	347.059573	-.0515655943
7	.015625	.127323955	.0979708616	-	-
8	.0175	.113682102	.13577663	352.60555	.0139934695
9	.019375	.102650609	.181493284	-	-
10	.02125	.0936205548	.235666129	360.843253	.210554341
11	.023125	.086029699	.299736137	-	-
12	.025	.0795774716	.377761005	377.411466	.681131553
13	.026875	.074025555	.473597407	-	-
14	.02875	.0691978014	.586875193	412.041766	1.75934256
15	.030625	.0649612013	.714576182	-	-
16	.0325	.0612134397	.853114196	480.497769	3.83624707
17	.034375	.0578745248	.999284521	-	-
18	.03625	.0548810149	1.15057231	599.318461	7.16179756
19	.038125	.0521819486	1.3051546	-	-
20	.04	.0497359198	1.46178038	781.862751	11.8535448
21	.041875	.0475089383	1.61962587	-	-
22	.04375	.0454728409	1.77816739	1037.73348	17.963319
23	.045625	.043604094	1.9370842	-	-
24	.0475	.0418828798	2.09619006	1373.66709	25.5206914
25	.049375	.0402923907	2.25538738	-	-
26	.05125	.0388182788	2.41463799	1794.52766	34.551487
27	.053125	.0374482219	2.573945	-	-
28	.055	.036171578	2.73334211	2304.03354	45.0824621
29	.056875	.0349791084	2.8928877	-	-
30	.05875	.0338627539	3.0526616	2905.25411	57.1477603
31	.060625	.0328154522	3.21276336	-	-
32	.0625	.0318309886	3.37331049	3600.9754	70.7927689

POT. ROTOR = 2.9575418

POT. LIQ. = .472903961 POT. UTIL = .471763012

RENDIMENTO = .159511866

REYNOLDS MAX. = 2472.8557 EM I=17

TAL MAX. = 40.6975882 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .159511866 EM I=32

MACC = 1.9752-05

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RM ? 2.5E-3,62.5E-3
B,E ? 4E-3,1E-4
VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
ROT(rpm),Q(l/min) ? 1500,3.5
NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT. RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN.(mmHg)
0	2.5E-03	.928403835	0	0
1	4.375E-03	.530516477	1.73646412E-03	-
2	6.25E-03	.371361534	5.49846543E-03	418.800022
3	8.125E-03	.285662719	.0122197282	-
4	.01	.232100959	.0227444742	461.685207
5	.011875	.193453439	.0378550956	-
6	.01375	.168800697	.0582694741	473.847966
7	.015625	.148544614	.0846345724	-
8	.0175	.132629119	.117520972	480.068513
9	.019375	.119794043	.157435421	-
10	.02125	.109223981	.205058818	487.170168
11	.023125	.100367982	.262791213	-
12	.025	.0928403835	.336097405	500.314531
13	.026875	.0863631474	.428194078	-
14	.02875	.0807307683	.537998911	528.724526
15	.030625	.0757880682	.662504952	-
16	.0325	.0714156796	.798297881	587.540582
17	.034375	.0675202789	.942267787	-
18	.03625	.0640278507	1.09189157	693.111575
19	.038125	.06087894	1.24527038	-
20	.04	.0580252397	1.40104895	859.186435
21	.041875	.0554270946	1.55829729	-
22	.04375	.0530516477	1.71639646	1095.93141
23	.045625	.050871443	1.87494492	-
24	.0475	.0488633597	2.03368849	1410.53798
25	.049375	.0470077891	2.19247086	-
26	.05125	.045287992	2.35120011	1808.1241
27	.053125	.0436895922	2.50982667	-
28	.055	.0422001743	2.66832919	2292.44025
29	.056875	.0408089598	2.82670571	-
30	.05875	.0395065462	2.9849683	2866.34258
31	.060625	.0382846942	3.14313995	-
32	.0625	.0371361534	3.3012529	3532.10731

POT. ROTOR = 3.29574061
POT. LIO. = .525155319 POT. UTIL = .523346879
RENDIMENTO = .158794924
REYNOLDS MAX. = 2556.17339 EM I=17
TAL MAX. = 45.0057272 EM I=32
RENDIMENTO MAX. = .158794924 EM I=32

1=0.0 R=1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3

B,E ? 4E-3,1E-4

VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3

ROT(rpm),Q(l/min) ? 1750,.5

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 16

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? S

PRECISOES RELATIVAS: EV,EP ? .01,.01

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.132629119	0	0	0
1	4.375E-03	.0757880683	.0139204646	-	-
2	6.25E-03	.0530516478	.0429962757	8.08341206	3.16196716E-03
3	8.125E-03	.0408089598	.0925904383	-	-
4	.01	.0331572798	.165881835	13.5072537	.141738949
5	.011875	.0279219199	.26408674	-	-
6	.01375	.0241143853	.306646425	38.7583786	.827720589
7	.015625	.0212206591	.531552833	-	-
8	.0175	.018947017	.695774235	114.168459	2.76068554
9	.019375	.0171134348	.875712111	-	-
10	.02125	.0156034258	1.0676241	277.28181	6.66524362
11	.023125	.0143382832	1.26796558	-	-
12	.025	.0132629119	1.47362554	562.32586	13.0225548
13	.026875	.0123375925	1.68205436	-	-
14	.02875	.0115329669	1.89129776	993.023634	22.000939
15	.030625	.0108268669	2.09996102	-	-
16	.0325	.0102022399	2.30712997	1581.63749	33.5563154
17	.034375	9.64575413E-03	2.51227273	-	-
18	.03625	9.14683582E-03	2.71514063	2331.98859	47.5656141
19	.038125	8.69699143E-03	2.91568002	-	-
20	.04	8.28931996E-03	3.11396077	3243.2152	63.9091836
21	.041875	7.91815638E-03	3.31012272	-	-
22	.04375	7.57890682E-03	3.50433841	4312.52017	82.4975142
23	.045625	7.267349E-03	3.696789	-	-
24	.0475	6.98047997E-03	3.88765019	5536.66111	103.269152
25	.049375	6.71539845E-03	4.07708476	-	-
26	.05125	6.46971314E-03	4.26523964	6912.57769	126.181526
27	.053125	6.24137032E-03	4.45224536	-	-
28	.055	6.02859633E-03	4.638217	8437.58013	151.203543
29	.056875	5.8298514E-03	4.82325565	-	-
30	.05875	5.64379231E-03	5.00745009	10109.3607	178.311218
31	.060625	5.46924203E-03	5.19087842	-	-
32	.0625	5.30516477E-03	5.37360947	11925.9501	207.485324

POT. ROTOR = 2.69440304

POT. LID. = .230446863 POT. UTIL = .230447034

RENDIMENTO = .0855280483

REYNOLDS MAX. = 1319.54634 EM I=8

TAL MAX. = 36.4806964 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .15932147 EM I=14

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
 B,E ? 4E-3,1E-4
 VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
 ROT(rpm),Q(l/min) ? 1750,1
 NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
 DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.265258239	0	0	0
1	4.375E-03	.151576136	7.03579433E-03	-	-
2	6.25E-03	.106103296	.0220469656	32.9617746	-.0111155761
3	8.125E-03	.0816179197	.0483465542	-	-
4	.01	.0663146597	.088525902	37.1580068	.0222259544
5	.011875	.0558438397	.144521188	-	-
6	.01375	.0482287707	.217592887	45.3274317	.236588962
7	.015625	.0424413182	.308327465	-	-
8	.0175	.0378940341	.416674129	71.0168914	.941991068
9	.019375	.0342268695	.542014399	-	-
10	.02125	.0312068516	.683256133	133.926161	2.61107222
11	.023125	.0286765663	.838939972	-	-
12	.025	.0265258239	1.00735056	259.305149	5.79113052
13	.026875	.024675185	1.18663085	-	-
14	.02875	.0230659338	1.37489142	474.339245	10.9841141
15	.030625	.0216537338	1.57030073	-	-
16	.0325	.0204044799	1.77115118	804.11658	18.5556525
17	.034375	.0192915083	1.97590433	-	-
18	.03625	.0182936716	2.18321934	1268.77245	28.7047458
19	.038125	.0173939829	2.39196596	-	-
20	.04	.0165786399	2.60122327	1882.37175	41.4862752
21	.041875	.0158363128	2.81026887	-	-
22	.04375	.0151576136	3.01855851	2653.27387	56.8605923
23	.045625	.014534698	3.22570282	-	-
24	.0475	.0139609599	3.43144172	3585.34547	74.7436164
25	.049375	.0134307969	3.63541938	-	-
26	.05125	.0129394263	3.838161	4679.39023	95.0425197
27	.053125	.0124827406	4.03905241	-	-
28	.055	.0120571927	4.23832273	5934.39299	117.674523
29	.056875	.0116597028	4.43603041	-	-
30	.05875	.0112875846	4.63225217	7348.42282	142.573071
31	.060625	.0109384841	4.82707474	-	-
32	.0625	.0106103295	5.02058882	8919.20352	169.687097

POT. ROTOR = 2.9372105
 POT. LIQ. = .376972629 POT. UTIL = .376931605
 RENDIMENTO = .128329789
 REYNOLDS MAX. = 1865.59776 EM I=12
 VAL MAX. = 18.5988698 EM I=32
 RENDIMENTO MAX. = .15934669 EM I=20

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3

B, E ? 4E-3, 1E-4

VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3

ROT(rpm), Q(l/min) ? 1750, 1.5

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.397887358	0	0	0
1	4.375E-03	.227364205	4.70751288E-03	-	-
2	6.25E-03	.159154943	.0148230859	75.3880067	-.0194383715
3	8.125E-03	.122426879	.0327073476	-	-
4	.01	.0994718395	.0603436709	83.077616	-.0112293917
5	.011875	.0837657596	.0993903011	-	-
6	.01375	.072343156	.15116079	88.3177395	.0675520178
7	.015625	.0636619773	.216606461	-	-
8	.0175	.0568410511	.296317807	101.42266	.443287248
9	.019375	.0513403043	.390594491	-	-
10	.02125	.0468102774	.499737236	134.290364	1.34783819
11	.023125	.0430148495	.624501932	-	-
12	.025	.0397887358	.765570628	204.059739	3.243908
13	.026875	.0370127775	.921837265	-	-
14	.02875	.0345989007	1.09026364	334.131542	6.68209951
15	.030625	.0324806006	1.26741235	-	-
16	.0325	.0306067198	1.4505784	549.091567	12.0373846
17	.034375	.0289372624	1.63805239	-	-
18	.03625	.0274405074	1.82894102	868.530864	19.5073025
19	.038125	.0260909743	2.02286985	-	-
20	.04	.0248679599	2.21969537	1307.56095	29.2698295
21	.041875	.0237544691	2.41927423	-	-
22	.04375	.0227364205	2.62132625	1879.13272	41.5084093
23	.045625	.021802047	2.82540752	-	-
24	.0475	.0209414399	3.03096566	2594.47251	56.3432789
25	.049375	.0201461953	3.23742203	-	-
26	.05125	.0194091394	3.44423817	3462.16455	73.7959564
27	.053125	.018724111	3.65095269	-	-
28	.055	.018085789	3.85719347	4487.67523	93.8195998
29	.056875	.0174895542	4.0626752	-	-
30	.05875	.0169313769	4.26719	5673.73472	116.339258
31	.060625	.0164077261	4.47059556	-	-
32	.0625	.0159154943	4.67280327	7021.06651	141.276143

POT. ROTOR = 3.15722877

POT. LID. = .470876188 POT. UTIL = .470732109

RENDIMENTO = .149096611

REYNOLDS MAX. = 2244.64467 EM I=14

RA MAX. = 40.6856356 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .159338433 EM I=24

RAIO = 2.5E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3

B, E ? 4E-3, 1E-4

VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3

ROT(rpm), Q(l/min) ? 1750, 2

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT. RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.530516477	0	0
1	4.375E-03	.303152273	3.53703066E-03	-
2	6.25E-03	.212206591	.0111646829	135.199469
3	8.125E-03	.163235839	.0247121233	-
4	.01	.132629119	.0457678934	148.733175
5	.011875	.111687679	.0757251099	-
6	.01375	.0964575413	.11576871	154.11039
7	.015625	.0848826364	.168860872	-
8	.0175	.0757880682	.229763293	162.666562
9	.019375	.068453739	.305453714	-
10	.02125	.0624137032	.397222784	183.12212
11	.023125	.0573531327	.510857096	-
12	.025	.0530516477	.647255459	230.196164
13	.026875	.04935037	.801953604	-
14	.02875	.0461318676	.969393084	328.769037
15	.030625	.0433074675	1.14496466	-
16	.0325	.0408089598	1.32542331	504.14821
17	.034375	.0385830165	1.50869167	-
18	.03625	.0365873433	1.69352823	774.958848
19	.038125	.0347879657	1.87923923	-
20	.04	.0331572798	2.06347493	1153.60967
21	.041875	.0316726255	2.25210045	-
22	.04375	.0303152273	2.43911955	1648.66391
23	.045625	.029069396	2.6266317	-
24	.0475	.0279219199	2.81480746	2266.72401
25	.049375	.0268615938	3.00387049	-
26	.05125	.0258788525	3.19407615	3013.70886
27	.053125	.0249654813	3.38567875	-
28	.055	.0241143853	3.57888469	3895.70931
29	.056875	.0233194056	3.7737997	-
30	.05875	.0225751692	3.97038981	4919.27231
31	.060625	.0218769681	4.1684751	-
32	.0625	.0212206591	4.36776058	6090.82879

POT. ROTOR = 3.45715259

POT. LIQ. = .54449438 POT. UTIL = .544151463

RENDIMENTO = .15737874

REYNOLDS MAX. = 2420.67524 EM I=14

TAL MAX. = 42.5530388 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .159911246 EM I=28

RAIO 2 R=1.575E-03

IPR#0
 CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS
 UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
 B,E ? 4E-3,1E-4
 VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
 ROT(rpm),Q(l/min) ? 1750,2.5
 NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
 DESEJA ESTIMAR PRECIS0ES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.663145597	0	0	0
1	4.375E-03	.378940341	2.83270162E-03	-	-
2	6.25E-03	.265258237	8.95460018E-03	212.375205	-.0339496631
3	8.125E-03	.204044799	.0198576505	-	-
4	.01	.165786399	.0368625237	233.775595	-.0445087145
5	.011875	.139609599	.0611585798	-	-
6	.01375	.120571927	.0937958403	240.643703	-.0155651384
7	.015625	.106103295	.135675277	-	-
8	.0175	.0947350852	.18761965	247.492924	.121073611
9	.019375	.0855671738	.251508204	-	-
10	.02125	.078017129	.334053184	261.893099	.52926445
11	.023125	.0716914158	.441673841	-	-
12	.025	.0663145596	.573144897	297.293173	1.67457572
13	.026875	.0616879625	.723527406	-	-
14	.02875	.0576649345	.887436355	377.578398	4.14935523
15	.030625	.0541343344	1.06033395	-	-
16	.0325	.0510111997	1.2388642	527.963732	8.33005135
17	.034375	.0482267707	1.42074218	-	-
18	.03625	.0457341791	1.60449873	768.042747	14.3803169
19	.038125	.0434849571	1.78922861	-	-
20	.04	.0414465998	1.97439372	1111.17536	22.3665126
21	.041875	.0395907819	2.15968617	-	-
22	.04375	.0378940341	2.34493972	1566.29283	32.3248204
23	.045625	.036336745	2.53007503	-	-
24	.0475	.0349023998	2.71506727	2139.57733	44.2836403
25	.049375	.0335769922	2.89992749	-	-
26	.05125	.0323485657	3.08469255	2835.55624	58.2709225
27	.053125	.0312068516	3.26942013	-	-
28	.055	.0301429817	3.45418683	3657.79173	74.3192558
29	.056875	.029149257	3.63908807	-	-
30	.05875	.0282189615	3.82423898	4609.36355	92.4720625
31	.060625	.0273462102	4.00977509	-	-
32	.0625	.0265258239	4.19585187	5693.26343	112.791251

POT. ROTOR = 3.92882856
 POT. LID. = .627033159 POT. UTIL = .626367416
 RENDIMENTO = .159428543
 REYNOLDS MAX. = 2540.23987 EM I=14
 TAL MAX. = 45.6561766 EM I=32
 RENDIMENTO MAX. = .159972398 EM I=30

1FR#0

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVODADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3

B,E ? 4E-3,1E-4

VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3

ROT(rpm),Q(l/min) ? 1750,3

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 16

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? S

PRECISOES RELATIVAS: EV,EP ? .02,.02

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN.(mmHg)
0	2.5E-03	.795774716	0	0	0
1	4.375E-03	.454728409	2.36229661E-03	-	-
2	6.25E-03	.318309886	7.4749042E-03	306.909953	-.0409585672
3	8.125E-03	.244853759	.016597177	-	-
4	.01	.198943679	.0308578397	338.114782	-.0571185951
5	.011875	.167531519	.0512907424	-	-
6	.01375	.144686312	.0788298573	347.364501	-.0425330005
7	.015625	.127323955	.114303986	-	-
8	.0175	.113682102	.158571394	353.85591	.0508733618
9	.019375	.102680609	.214459441	-	-
10	.02125	.0936205548	.290469444	365.005764	.359282588
11	.023125	.086029697	.391918134	-	-
12	.025	.0795774716	.517242551	393.072917	1.30863164
13	.026875	.074025555	.662064631	-	-
14	.02875	.0691978014	.821438432	460.321576	3.47179637
15	.030625	.0649612013	.990952832	-	-
16	.0325	.0612134397	1.16714826	501.624007	7.26364988
17	.034375	.0578745248	1.34752842	-	-
18	.03625	.0548810149	1.53039479	807.505526	12.8870838
19	.038125	.0521819486	1.71464115	-	-
20	.04	.0497359198	1.89957126	1122.50811	20.4261986
21	.041875	.0475089383	2.08475934	-	-
22	.04375	.0454728409	2.2699522	1546.46468	29.9203851
23	.045625	.043604094	2.45500433	-	-
24	.0475	.0418828798	2.63983657	2086.10085	41.3941256
25	.049375	.0402923907	2.82441058	-	-
26	.05125	.0388182788	3.00871341	2746.17012	54.8658796
27	.053125	.0374482219	3.19274839	-	-
28	.055	.036171578	3.37652976	3530.15688	70.3511219
29	.056875	.0349791084	3.5600798	-	-
30	.05875	.0338627539	3.74342726	4440.71503	87.8644672
31	.060625	.0328154522	3.92660671	-	-
32	.0625	.0318309886	4.10965858	5479.96185	107.421974

POT. ROTOR = 4.47858268

POT. LIG. = .717002691 POT. UTIL = .715860032

RENDIMENTO = .159840754

REYNOLDS MAX. = 2639.79306 EM I=15

VAL MAX. = 31.4776486 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .159840754 EM I=32

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3

B,E ? 4E-3,1E-4

VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3

ROT(rpm),D(1/min) ? 1750,3.5

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.928403835	0	0	0
1	4.375E-03	.530316477	2.02587481E-03	-	-
2	6.25E-03	.371361534	6.41487634E-03	418.80189	-.0479154386
3	8.125E-03	.285662719	.0142563495	-	-
4	.01	.232100959	.02653522	461.719076	-.0688605619
5	.011875	.195453439	.0441642789	-	-
6	.01375	.168800697	.0679811459	474.074053	-.0640410616
7	.015625	.148544614	.098746745	-	-
8	.0175	.132629119	.137349756	480.99927	1.63726691E-03
9	.019375	.119794043	.187404209	-	-
10	.02125	.109223981	.257917082	490.35723	.243315705
11	.023125	.100367982	.353319384	-	-
12	.025	.0928403835	.472372636	513.399073	1.04283719
13	.026875	.0863631474	.611375246	-	-
14	.02875	.0807307683	.765855099	570.758202	2.95036471
15	.030625	.0757980682	.931589925	-	-
16	.0325	.0714156796	1.10509582	686.733132	6.40983035
17	.034375	.0675202789	1.28349423	-	-
18	.03625	.0640278507	1.46547903	882.532261	11.6629067
19	.038125	.06087894	1.64910461	-	-
20	.04	.0580252397	1.83387918	1173.80115	18.8155023
21	.041875	.0554270946	2.01907134	-	-
22	.04375	.0530516477	2.20434813	1571.31729	27.9141947
23	.045625	.050871443	2.38966207	-	-
24	.0475	.0488633597	2.57471179	2082.46132	38.9844221
25	.049375	.0470077891	2.75950968	-	-
26	.05125	.045287992	2.94401137	2712.4052	52.0434882
27	.053125	.0436895922	3.12820291	-	-
28	.055	.0422001743	3.31208303	3464.88151	67.1043088
29	.056875	.0408089598	3.49565831	-	-
30	.05875	.0395065462	3.67894049	4342.65778	84.1768972
31	.060625	.0382846942	3.86194472	-	-
32	.0625	.0371361534	4.04468868	5347.83729	103.269521

POT. ROTOR = 5.02298799

POT. LIG. = .804694689 POT. UTIL = .802886101

RENDIMENTO = .159842329

REYNOLDS MAX. = 2726.60401 EM I=15

IAL MAX. = 57.8055733 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .15984233 EM I=32

RAIO = 1.375E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3
 B, E ? 4E-3, 1E-4
 VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3
 ROT(rpm), Q(l/min) ? 1750, 4
 NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
 DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	FRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	1.06103295	0	0	0
1	4.375E-03	.606304546	1.77332948E-03	-	-
2	6.25E-03	.424413182	5.61815404E-03	548.050252	-.0548444365
3	8.125E-03	.326471679	.0124941785	-	-
4	.01	.265258239	.0232747605	604.575033	-.0801338533
5	.011875	.223375359	.0387763045	-	-
6	.01375	.192915083	.0597565394	620.626744	-.0825667778
7	.015625	.169765273	.0869162449	-	-
8	.0175	.151576136	.121172172	628.57107	-.0359895722
9	.019375	.136907478	.166711496	-	-
10	.02125	.124827406	.232408021	637.025449	.157762013
11	.023125	.114706265	.322166739	-	-
12	.025	.106103295	.435208254	656.476196	.839455921
13	.026875	.0987007399	.568459079	-	-
14	.02875	.0922637352	.717915555	706.081606	2.53327156
15	.030625	.0866149351	.879601855	-	-
16	.0325	.0816179196	1.0500741	809.39061	5.70202036
17	.034375	.077166033	1.22658533	-	-
18	.03625	.0731746865	1.40706684	988.031573	10.6237996
19	.038125	.0695759314	1.59002961	-	-
20	.04	.0663145596	1.77444251	1258.63562	17.4295653
21	.041875	.063345251	1.95961554	-	-
22	.04375	.0606304545	2.14510134	1632.92439	26.175628
23	.045625	.058138792	2.33061864	-	-
24	.0475	.0558438397	2.51599627	2118.96604	36.8893434
25	.049375	.0537231876	2.7011342	-	-
26	.05125	.0517577051	2.88597736	2722.3865	49.5877221
27	.053125	.0499309626	3.07049866	-	-
28	.055	.0482287707	3.25468814	3447.21358	64.2830628
29	.056875	.0466388112	3.43854623	-	-
30	.05875	.0451503385	3.62207963	4296.40714	80.9845362
31	.060625	.0437539363	3.80529874	-	-
32	.0625	.0424413182	3.9882162	5272.18957	99.6989572

POT. ROTOR = 5.54928276
 POT. LID. = .888554236 POT. UTIL = .885858468
 RENDIMENTO = .159634768
 REYNOLDS MAX. = 2804.38226 EM I=16
 TAL MAX. = 64.077975 EM I=32
 RENDIMENTO MAX. = .159634768 EM I=32

I=32 H=1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3

B, E ? 4E-3, 1E-4

VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3

ROT(rpm), Q(l/min) ? 2000, .5

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 16

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? S

PRECISOES RELATIVAS: EV, EP ? .02, .02

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.132629119	0	0	0
1	4.375E-03	.0757890683	.0159091024	-	-
2	6.25E-03	.0530516478	.0491326008	8.18204561	6.23510978E-03
3	8.125E-03	.0408089598	.103817344	-	-
4	.01	.0331572798	.18937924	15.1216022	.188307868
5	.011875	.0279219199	.301913417	-	-
6	.01375	.0241143853	.44199163	48.1131284	1.08501153
7	.015625	.0212206591	.607488958	-	-
8	.0175	.018947017	.795170569	146.644228	3.61025155
9	.019375	.0171134348	1.00081386	-	-
10	.02125	.0156034258	1.22014185	359.730091	8.71052628
11	.023125	.0143382832	1.44910353	-	-
12	.025	.0132629119	1.68414349	732.070747	17.0143245
13	.026875	.0123375925	1.92234785	-	-
14	.02875	.0115329669	2.16148315	1294.65018	28.7415129
15	.030625	.0108268669	2.39995545	-	-
16	.0325	.0102022399	2.63671996	2063.48447	43.8345295
17	.034375	9.645375413E-03	2.87116893	-	-
18	.03625	9.14693582E-03	3.10301786	3043.56472	62.1326384
19	.038125	8.69699143E-03	3.33220573	-	-
20	.04	8.28931996E-03	3.55891231	4233.76574	83.4795664
21	.041875	7.91815638E-03	3.7829974	-	-
22	.04375	7.57890682E-03	4.00495818	5630.43438	107.758407
23	.045625	7.267349E-03	4.22490172	-	-
24	.0475	6.98047997E-03	4.44302879	7229.33593	134.888897
25	.049375	6.71539845E-03	4.65932545	-	-
26	.05125	6.46971314E-03	4.87455959	9026.47345	164.815437
27	.053125	6.24137032E-03	5.08828041	-	-
28	.055	6.02859633E-03	5.30081942	11018.334	197.497416
29	.056875	5.8298514E-03	5.51229217	-	-
30	.05875	5.64379231E-03	5.72280011	13201.9034	232.90351
31	.060625	5.46924203E-03	5.93243248	-	-
32	.0625	5.30516477E-03	6.14126797	15574.6099	271.008607

POT. ROTOR = 3.5192203

POT. LID. = .300998394 POT. UTIL = .301000226

RENDIMENTO = .0855303733

REYNOLDS MAX. = 1507.97598 EM I=8

TAL MAX. = 41.6922207 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .159352476 EM I=14

h=32 H=1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS
UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
S,E ? 4E-3,1E-4
VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
ROT(rpm),Q(l/min) ? 2000,1
NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.265258239	0	0	0
1	4.375E-03	.151576136	8.04090781E-03	-	-
2	6.25E-03	.106103296	.0251965321	32.9874323	-.0103079165
3	8.125E-03	.0816179197	.0552532048	-	-
4	.01	.0663145597	.101173459	37.603294	.0353887075
5	.011875	.0558438397	.165167877	-	-
6	.01375	.0482287707	.248677858	48.121471	.316829096
7	.015625	.0424413187	.352380339	-	-
8	.0175	.0378940341	.476264696	81.6764663	1.23956438
9	.019375	.0342268698	.619830574	-	-
10	.02125	.0312068516	.782217338	164.020969	3.42980167
11	.023125	.0286765663	.9618926	-	-
12	.025	.0265258239	1.15635021	328.922462	7.63159817
13	.026875	.024675185	1.36262816	-	-
14	.02875	.0230659338	1.57812275	612.452406	14.4742549
15	.030625	.0216537338	1.80087274	-	-
16	.0325	.0204044799	2.02935183	1046.18288	24.3842581
17	.034375	.0192915083	2.26219471	-	-
18	.03625	.0182936716	2.49809265	1655.29318	37.6320172
19	.038125	.0173939829	2.73583002	-	-
20	.04	.0165786399	2.97435117	2458.05583	54.3124229
21	.041875	.0158363128	3.21279756	-	-
22	.04375	.0151576136	3.45051022	3465.67208	74.3821425
23	.045625	.014534698	3.68701152	-	-
24	.0475	.0139609599	3.92197806	4683.44905	97.7324581
25	.049375	.0134307969	4.15521164	-	-
26	.05125	.0129394263	4.38661177	6112.60091	124.24131
27	.053125	.0124827406	4.61615121	-	-
28	.055	.0120571927	4.84385534	7751.89426	153.799499
29	.056875	.0116597028	5.0697853	-	-
30	.05875	.0112875846	5.29402487	9598.85485	186.31923
31	.060625	.0109384841	5.51667048	-	-
32	.0625	.0106103295	5.73782399	11650.5325	221.733245

POT. ROTOR = 3.83770299
POT. LIQ. = .492584614 POT. UTIL = .492543449
RENDIMENTO = .128343296
REYNOLDS MAX. = 2124.60525 EM I=12
TAL MAX. = 44.1129183 EM I=32
RENDIMENTO MAX. = .159403649 EM I=20

h=32 H=1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
 B,E ? 4E-3,1E-4
 VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
 ROT(rpm),Q(l/min) ? 2000,1.5
 NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
 DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.397887358	0	0	0
1	4.375E-03	.227364205	5.38001472E-03	-	-
2	6.25E-03	.159154943	.0169406696	75.3995637	-.019073313
3	8.125E-03	.122426879	.0373798282	-	-
4	.01	.0994718395	.0689641953	83.2822757	-5.12862635E-03
5	.011875	.0837657596	.113588934	-	-
6	.01375	.072343156	.172756852	89.6388467	.126078423
7	.015625	.0636619773	.247614374	-	-
8	.0175	.0568410511	.339808821	106.674388	.596188667
9	.019375	.0513403043	.455133088	-	-
10	.02125	.0468102774	.600014905	151.776176	1.92919488
11	.023125	.0430148495	.771224142	-	-
12	.025	.0397887358	.960722348	258.294351	5.02715798
13	.026875	.0370127775	1.16134511	-	-
14	.02875	.0345989007	1.36820178	464.252372	10.4508288
15	.030625	.0324806006	1.57837105	-	-
16	.0325	.0306067198	1.79026497	797.170207	18.3984862
17	.034375	.0289372624	2.00310799	-	-
18	.03625	.0274405074	2.21660146	1274.4976	28.9643634
19	.038125	.0260909743	2.43073253	-	-
20	.04	.0248679599	2.64567212	1908.11085	42.2486962
21	.041875	.0237544691	2.86171741	-	-
22	.04375	.0227364205	3.07924408	2707.66706	58.3971246
23	.045625	.021802047	3.29864089	-	-
24	.0475	.0209414399	3.52021417	3682.71124	77.6124971
25	.049375	.0201461953	3.74408132	-	-
26	.05125	.0194091394	3.9701045	4843.41836	100.100644
27	.053125	.018724111	4.19790701	-	-
28	.055	.018085789	4.42696259	6199.42468	125.961589
29	.056875	.0174895542	4.65670521	-	-
30	.05875	.0169313769	4.88661288	7757.86138	155.159936
31	.060625	.0164077261	5.11625126	-	-
32	.0625	.0159154943	5.34528511	9522.59706	187.59132

POT. ROTOR = 4.19740103
 POT. LID. = .625205839 POT. UTIL = .625054279
 RENDIMENTO = .148914596
 REYNOLDS MAX. = 2409.26202 EM I=12
 TAL MAX. = 46.4686597 EM I=32
 RENDIMENTO MAX. = .159944367 EM I=24

I=21 H=1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
B,E ? 4E-3,1E-4
VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
RDT(rpm),Q(l/min) ? 2000,2
NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
DESEJA ESTIMAR PRECISDES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.530516477	0	0	0
1	4.375E-03	.303152273	4.04232076E-03	-	-
2	6.25E-03	.212206591	.0127596376	135.206013	-.0266242781
3	8.125E-03	.153235839	.0322324266	-	-
4	.01	.103629119	.052306164	148.850262	-.0261395365
5	.011875	.111687679	.0863430179	-	-
6	.01375	.0964575413	.132311084	154.877259	.0451158349
7	.015625	.0848826364	.190896182	-	-
8	.0175	.0757880682	.266354609	165.825403	.331775313
9	.019375	.068453739	.370261484	-	-
10	.02125	.0624137032	.507121772	196.161396	1.31276868
11	.023125	.0573531327	.671464683	-	-
12	.025	.0530516477	.85539239	277.125121	3.85555343
13	.026875	.04935037	1.05192958	-	-
14	.02875	.0461318676	1.25597795	446.190751	8.5792447
15	.030625	.0433074675	1.46420298	-	-
16	.0325	.0408089598	1.67457676	732.662698	15.7427088
17	.034375	.0385830165	1.88592901	-	-
18	.03625	.0365873433	2.09761306	1155.66578	25.4404193
19	.038125	.0347879657	2.30929846	-	-
20	.04	.0331572798	2.52079036	1727.36314	37.7207515
21	.041875	.0316726255	2.73205503	-	-
22	.04375	.0303152273	2.94307914	2455.84325	52.6208697
23	.045625	.029069396	3.15389856	-	-
24	.0475	.0279219199	3.36457812	3346.86547	70.1773584
25	.049375	.0268615938	3.57520768	-	-
26	.05125	.0258788525	3.78590176	4404.90939	90.4345915
27	.053125	.0249654813	3.99680127	-	-
28	.055	.0241143853	4.20807582	5633.90678	113.455515
29	.056875	.0233194056	4.41992496	-	-
30	.05875	.0225751692	4.63257544	7037.85735	139.334848
31	.060625	.0218769581	4.84627022	-	-
32	.0625	.0212206591	5.06124484	8621.38101	168.207829

POT. ROTOR = 4.79401102
POT. LIQ. = .747639537 POT. UTIL = .747291314
RENDIMENTO = .155880183
REYNOLDS MAX. = 2562.80726 EM I=12
TAL MAX. = 49.0665849 EM I=32
RENDIMENTO MAX. = .160022975 EM I=36

DE 11 B=1.975E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3

B, E ? 4E-3, 1E-4

VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3

ROT(rpm), Q(l/min) ? 2000, 2.5

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

FT. RAID	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.663145597	0	0
1	4.375E-03	.378940341	3.23737327E-03	-
2	6.25E-03	.265258239	.01021338288	212.379411
3	8.125E-03	.204044799	.0226944577	-
4	.01	.163786399	.0421285986	233.851299
5	.011875	.139609599	.0690755712	-
6	.01375	.120571927	.107201824	241.143884
7	.015625	.106103295	.155428145	-
8	.0175	.0947350852	.220677412	249.611631
9	.019375	.0855671738	.315565887	-
10	.02125	.078017129	.443045553	272.065979
11	.023125	.0716914158	.598333369	-
12	.025	.0663145596	.775174616	336.548418
13	.026875	.0616879625	.966380294	-
14	.02875	.0576648345	1.1669091	479.281106
15	.030625	.0541343344	1.37303446	-
16	.0325	.0510111997	1.58229995	731.150077
17	.034375	.0482287707	1.79317381	-
18	.03625	.0457341791	2.00474135	1113.46885
19	.038125	.0434849571	2.216476	-
20	.04	.0414465998	2.42808548	1640.0078
21	.041875	.0395907819	2.639415	-
22	.04375	.0378940341	2.85038918	2319.78203
23	.045625	.036336745	3.06097832	-
24	.0475	.0349023998	3.27117932	3158.92757
25	.049375	.0335767922	3.48100501	-
26	.05125	.0323485657	3.69047847	4161.79174
27	.053125	.0312068516	3.89962994	-
28	.055	.0301429817	4.10849551	5331.57957
29	.056875	.029149257	4.31711665	-
30	.05875	.0282189615	4.52554041	6670.77065
31	.060625	.0273462102	4.73382008	-
32	.0625	.0265258239	4.94201621	8181.41841

POT. ROTOR = 5.60829315

POT. LID. = .885539678 POT. UTIL = .884878398

RENDIMENTO = .15778034

REYNOLDS MAX. = 2687.20237 EM I=13

TAL MAX. = 55.9769818 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .159932041 EM I=38

DELTA = 1.875E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3
 B, E ? 4E-3, 1E-4
 VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3
 ROT(rpm), Q(l/min) ? 2000, 3
 NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
 DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	.795774716	0	0	0
1	4.375E-03	.434728409	2.69976755E-03	-	-
2	6.25E-03	.318309886	8.54274767E-03	306.912881	-.0408657432
3	8.125E-03	.244853759	.0189682023	-	-
4	.01	.192943679	.0352661028	338.167714	-.0555272109
5	.011875	.167531519	.0586180587	-	-
6	.01375	.144686312	.0901004569	347.716192	-.0321014657
7	.015625	.127323955	.131175139	-	-
8	.0175	.113682102	.189163614	355.361099	.105584303
9	.019375	.102680609	.276064491	-	-
10	.02125	.0936205548	.394514309	373.042981	.711014811
11	.023125	.086029699	.54112391	-	-
12	.025	.0795774716	.710085506	425.87246	2.52243045
13	.026875	.074025555	.895333644	-	-
14	.02875	.06891978014	1.09168287	548.395424	6.2465381
15	.030625	.0649612013	1.29516754	-	-
16	.0325	.0612134397	1.50297155	772.439315	12.2867412
17	.034375	.0578745248	1.71320579	-	-
18	.03625	.0548810149	1.92466203	1121.29791	20.8115224
19	.038125	.0521819486	2.13659929	-	-
20	.04	.0497359198	2.34858073	1610.42232	31.8867125
21	.041875	.0475089383	2.56035927	-	-
22	.04375	.0454728409	2.77180244	2249.93056	45.5447574
23	.045625	.043604094	2.98284516	-	-
24	.0475	.0416828798	3.19346126	3046.63219	61.8066962
25	.049375	.0402923907	3.40364671	-	-
26	.05125	.0388182788	3.61340994	4005.27367	80.6874931
27	.053125	.0374482219	3.82276643	-	-
28	.055	.036171578	4.0317356	5129.26374	102.19789
29	.056875	.0349791084	4.24033919	-	-
30	.05875	.0338627539	4.44860037	6421.11155	126.345891
31	.060625	.0328154522	4.65654536	-	-
32	.0625	.0318309886	4.86419331	7882.70942	153.138226

POT. ROTOR = 6.43021325
 POT. LID. = 1.02165208 POT. UTIL = 1.02051314
 RENDIMENTO = .158705956
 REYNOLDS MAX. = 2791.03512 EM I=13
 TAL MAX. = 64.0158796 EM I=32
 RENDIMENTO MAX. = .159812172 EM I=28

RAIO = 1.975E-03

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RA,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
B,E ? 4E-3,1E-4
VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
ROT(rpm),Q(l/min) ? 2000,3.5
NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 16
DESEJA ESTIMAR PRECOES (S OU N) ? S
PRECOES RELATIVAS: EV,EP ? .02,.02

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN.(mmHg)
0	2.5E-03	.928403835	0	0	0
1	4.375E-03	.530516477	2.31528549E-03	-	-
2	6.25E-03	.371361534	7.33128724E-03	418.804046	-.0478470755
3	8.125E-03	.285662719	.01132929709	-	-
4	.01	.232100959	.0303259659	461.758155	-.0676842126
5	.011875	.195453439	.0504735456	-	-
6	.01375	.168800697	.0777044761	474.334611	-.0562866325
7	.015625	.148544614	.11354662	-	-
8	.0175	.132629119	.165908746	482.097288	.0450861716
9	.019375	.119794043	.243842496	-	-
10	.02125	.109223981	.356088852	496.748727	.537540874
11	.023125	.100367982	.494288408	-	-
12	.025	.0928403835	.658567312	540.957346	2.09426046
13	.026875	.0863631474	.834459335	-	-
14	.02875	.0807307683	1.02602626	647.36072	5.43110354
15	.030625	.0757880682	1.22626005	-	-
16	.0325	.0714156796	1.43211574	848.108102	11.0131621
17	.034375	.0675202789	1.6413972	-	-
18	.03625	.0640278507	1.85259419	1168.19622	19.0582556
19	.038125	.06087894	2.06471468	-	-
20	.04	.0580252397	2.27713601	1624.79432	29.6503279
21	.041875	.0554270946	2.48948528	-	-
22	.04375	.0530516477	2.70155079	2229.21202	42.8235288
23	.045625	.050871443	2.91322084	-	-
24	.0475	.0488633597	3.12444355	2988.98369	58.597162
25	.049375	.0470077891	3.33520163	-	-
26	.05125	.045287992	3.54549716	3909.29584	76.9849867
27	.053125	.0436895922	3.75534262	-	-
28	.055	.0422001743	3.96475579	4993.83636	97.9969947
29	.056875	.0408089598	4.17375688	-	-
30	.05875	.0395065462	4.382367	6245.29324	121.640102
31	.060625	.0382846942	4.5906073	-	-
32	.0625	.0371361534	4.79849866	7665.66157	147.918933

POT. ROTOR = 7.22218903
POT. LIQ. = 1.15192699 POT. UTIL = 1.1500204
RENDIMENTO = .159234325
REYNOLDS MAX. = 3886.76739 EM I=14
POT. MAX. = 72.0893688 EM I=12
RENDIMENTO MAX. = .159897773 EM I=10

LAJILLO 25 ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

CONDIC. INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

ROT. R1 ? 2.5E-3, 62.5E-3

S.E ? 4E-3, 1E-4

ISCO, DENS ? 4E-3, 1.09E3

ROT (rpm), 2 (1/min) ? 2000, 4

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

FT. RATO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
1	0.000000	0	0	0
2	0.000000	2.22666227E-03	-	-
3	0.000001	6.44074747E-03	548.051904	1.64712017
4	0.000003	.0142790811	-	-
5	0.000007	.0285997267	604.605063	1.0792290669
6	0.000015	.0443158791	-	-
7	0.000031	.0683074471	620.887311	1.0765770579
8	0.000063	.100153793	-	-
9	0.000125	.147963102	629.394687	1.07610743E-04
10	0.00025	.221863032	-	-
11	0.0005	.324782212	642.116863	1.406114167
12	0.001	.455171327	-	-
13	0.002	.60894148	679.764729	1.75550775
14	0.004	.781227915	-	-
15	0.008	.967466279	772.982668	4.75468253
16	0.016	1.1637869	-	-
17	0.032	1.36707973	953.686403	9.91756104
18	0.064	1.57494527	-	-
19	0.128	1.7856066	1248.23065	17.5175936
20	0.256	1.97780524	-	-
21	0.512	2.21049156	1675.53433	27.6661703
22	1.024	2.42372076	-	-
23	2.048	2.638363	2248.24674	40.4015433
24	4.096	2.84907225	-	-
25	8.192	3.06103398	2974.71519	55.7394835
26	16.384	3.27252925	-	-
27	32.768	3.48351118	3860.58388	73.6906386
28	65.536	3.69399045	-	-
29	131.072	3.90398656	4909.60892	94.2636261
30	262.144	4.11332293	-	-
31	524.288	4.32262409	6125.25037	117.464952
32	1048.576	4.53131453	-	-
33	2097.152	4.73961697	7509.02124	143.299015

Q. ROTOR = 1.982461371

Q. LID. = 1.2759954 Q. UTIL = 1.27325951

Q. LIDAMENTO = 1.189207394

Q. LID. MAX. = 1.072351113 EM I=1e

Q. LID. MAX. = 1.072351113 EM I=1e2

Q. LID. MAX. = 1.072351113 EM I=1e3

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RU ? 2.5E-3, 62.5E-3
B, E ? 4E-3, 1E-4
VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3
ROT(rpm), Q(l/min) ? 2000, 4.5
NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	1.17366207	0	0	0
1	4.375E-03	.682092614	1.80202425E-03	-	-
2	6.25E-03	.47746483	5.71139649E-03	694.655935	-.0617159851
3	8.125E-03	.367280638	.0127082351	-	-
4	.01	.298413519	.0236889445	766.69991	-.0904148533
5	.011875	.251297279	.0394971471	-	-
6	.01375	.217029468	.0609389739	787.319634	-.0945626759
7	.015625	.190985932	.0896339481	-	-
8	.0175	.170323153	.133666067	797.043184	-.0375926809
9	.019375	.154020913	.202336079	-	-
10	.02125	.140430832	.298737081	808.592303	.302498762
11	.023125	.129044548	.421933843	-	-
12	.025	.119366207	.568472341	841.154858	1.48075904
13	.026875	.111038332	.734041768	-	-
14	.02875	.103796702	.914505963	923.404761	4.18189277
15	.030625	.0974418019	1.10625934	-	-
16	.0325	.0918201596	1.30627971	1086.55949	8.95404394
17	.034375	.0868117872	1.51209965	-	-
18	.03625	.0823215223	1.72176321	1357.90606	16.1276216
19	.038125	.0782729229	1.93377609	-	-
20	.04	.0746038796	2.14704629	1758.07087	25.8530565
21	.041875	.0712634074	2.36081363	-	-
22	.04375	.0682092614	2.57458752	2301.23559	38.1794048
23	.045625	.065406141	2.78803839	-	-
24	.0475	.0628243197	3.00105876	2996.73399	53.1182824
25	.049375	.060438586	3.21350705	-	-
26	.05125	.0582274182	3.42537386	3850.73728	70.6741643
27	.053125	.0561723329	3.63666912	-	-
28	.055	.054257367	3.8474074	4867.46671	90.851983
29	.056875	.0524686626	4.05761901	-	-
30	.05875	.0507941308	4.26733492	6049.92508	113.656815
31	.060625	.0492231783	4.476586	-	-
32	.0625	.047746483	4.6854017	7400.31453	139.092742

POT. ROTOR = 8.71192731
POT. LID. = 1.39420531 POT. UTIL = 1.39037105
RENDIMENTO = .159593968
REYNOLDS MAX. = 3056.42073 EM I=15
FAL MAX. = 87.6078099 EM I=32
RENDIMENTO MAX. = .159593968 EM I=32

U = 1.275E-1

IRON

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVODADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RO, RN ? 2.5E-3, 62.5E-3

B, E ? 4E-3, 1E-4

VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3

ROT(rpm), Q(l/min) ? 2000, 5

NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32

DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT. SAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	0.000000	0.000000	0	0
1	0.000000	1.62228134E-03	-	-
2	0.000000	5.14323257E-03	858.614226	0.0686394842
3	0.000000	0.01144879E5	-	-
4	0.000000	0.02135237E6	948.036529	-0.101388603
5	0.000000	0.035623E284	-	-
6	0.000000	0.0550065E92	973.600672	-0.111109515
7	0.000000	0.081153E696	-	-
8	0.000000	0.121956703	984.927362	-0.0687613096
9	0.019375	0.186115873	-	-
10	0.02125	0.276713648	995.856998	0.218112221
11	0.023125	0.393312725	-	-
12	0.025	0.532961368	1024.43285	1.25314174
13	0.026875	0.691834351	-	-
14	0.02875	0.866224747	1097.4593	3.69015035
15	0.030625	1.05288263	-	-
16	0.0325	1.24888916	1245.10472	8.09564747
17	0.034375	1.45192391	-	-
18	0.03625	1.65993705	1495.11512	14.8522669
19	0.038125	1.87127935	-	-
20	0.04	2.08463095	1869.6415	24.1594324
21	0.041875	2.29907201	-	-
22	0.04375	2.51384225	2384.55618	36.0886711
23	0.045625	2.73849205	-	-
24	0.0475	2.94273032	3050.43483	50.6508854
25	0.049375	3.15639544	-	-
26	0.05125	3.3694136	3874.13782	67.8416416
27	0.053125	3.58176649	-	-
28	0.055	3.79346813	4860.19742	87.6584956
29	0.056875	4.00454947	-	-
30	0.05875	4.21504876	6011.74001	110.102741
31	0.060625	4.425006	-	-
32	0.0625	4.63445993	7331.01768	135.177118

POT. ROTOR = 9.41104059

POT. LIQ. = 1.30662496 POT. UTIL = 1.5013672

RENDIMENTO = .159532539

REYNOLDS MAX. = 3134.71947 EM I=16

Nu MAX. = 21.6596716 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .159532539 EM I=32

FIM DO PROGRAMA

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS

UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

PC, RN ? 2.5E-3, 62.5E 3
 S, E ? 4E-3, 1E-4
 VISC, DENS ? 4E-3, 1.09E3
 ROT(rpm), Q(l/min) ? 2000, 5.5
 NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
 DESEJA ESTIMAR PRECISAOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT. RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	1.45892031	0	0
1	4.375E-03	.83366875	1.47660014E-03	-
2	6.25E-03	.581368125	4.67889308E-03	1039.88292
3	8.125E-03	.448898558	.0104172453	-
4	.01	.364730078	.0194359625	1148.56864
5	.011875	.307141118	.0324423226	-
6	.01375	.265258239	.0501285269	1179.66991
7	.015625	.23342725	.0741749762	-
8	.0175	.208417187	.112296068	1192.93738
9	.019375	.188247782	.172427344	-
10	.02125	.171637684	.257843901	1203.67456
11	.023125	.157721115	.368400027	-
12	.025	.145892031	.501538255	1229.10882
13	.026875	.135713517	.6538503	-
14	.02875	.126862636	.822031776	1294.32371
15	.030625	.119095536	1.00314141	-
16	.0325	.112224639	1.19459387	1428.21586
17	.034375	.106103295	1.39411695	-
18	.03625	.100615194	1.59972665	1638.5367
19	.038125	.0956669057	1.80971806	-
20	.04	.0911825195	2.02266221	2008.63189
21	.041875	.0870997201	2.23740113	-
22	.04375	.083366875	2.45303581	2496.08241
23	.045625	.079940839	2.66890427	-
24	.0475	.0767852796	2.88454992	3132.97111
25	.049375	.0738693829	3.09968333	-
26	.05125	.0711688445	3.3141422	3927.11489
27	.053125	.0686550735	3.52785421	-
28	.055	.0663145596	3.74080601	4883.49652
29	.056875	.0641283654	3.95301953	-
30	.05875	.0620817154	4.16453542	6005.39105
31	.060625	.0601616823	4.37540216	-
32	.0625	.0583568125	4.58566966	7295.06958

POT. ROTOR = 10.0791709

POT. LID. = 1.61309324 POT. UTIL = 1.6060964

RENDIMENTO = .159348067

REYNOLDS MAX. = 3214.26073 EM I=16

VAL MAX. = 102.336953 EM I=32

RENDIMENTO MAX. = .159348067 EM I=32

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

CALCULO DO ESCOAMENTO NA BOMBA DE DISCOS - UM DISCO ROTATIVO

DADOS INICIAIS
UNIDADES NAO ESPECIFICADAS - SI

RG,RN ? 2.5E-3,62.5E-3
S,E ? 4E-3,1E-4
VISC,DENS ? 4E-3,1.09E3
ROT(rpm),Q(1/min) ? 2000,6
NUMERO (INICIAL) DE SUBINTERVALOS ? 32
DESEJA ESTIMAR PRECISOES (S OU N) ? N

RESULTADOS

PT.	RAIO	VEL. RADIAL	VEL. TANG.	PRESSAO	ALT. MAN. (mmHg)
0	2.5E-03	1.59154943	0	0	0
1	4.375E-03	.909456819	1.36521139E-03	-	-
2	6.25E-03	.178619773	4.295L043E-03	1238.12611	-.0860048832
3	8.125E-03	.489707818	9.56166675E-03	-	-
4	.01	.777887338	.0178395872	1367.9589	-.125490147
5	.01125	.035083008	.0297863281	-	-
6	.0125	.089372624	.0460497629	1405.18137	-.145166862
7	.01375	.254647909	.0683367186	-	-
8	.015	.213384205	.104104927	1420.69685	-.124230445
9	.01625	.205261217	.160725426	-	-
10	.02125	.1372411.	.241499024	1431.58588	.083514373
11	.023125	.172089398	.346521063	-	-
12	.025	.159154943	.47354479	1454.54531	.994385567
13	.026875	.14803111	.61951985	-	-
14	.02875	.138395603	.781508894	1513.11458	2.08594294
15	.030625	.129722407	.958896038	-	-
16	.0325	.122426879	1.14334979	1634.81099	6.63303456
17	.034375	.11574905	1.33077132	-	-
18	.03625	.10976203	1.54127109	1847.02183	12.5814505
19	.038125	.104363897	1.74916526	-	-
20	.04	.0994718395	1.96097947	2173.88027	21.035727
21	.041875	.0950178765	2.17545342	-	-
22	.04375	.0909456818	2.39164241	2634.50201	32.1482848
23	.045625	.0872081881	2.60011362	-	-
24	.0475	.0837657595	2.82513511	3242.62602	45.9621227
25	.049375	.0805247813	3.04215672	-	-
26	.05125	.0776365576	3.25828356	4007.33695	62.4638005
27	.053125	.0748964438	3.47364505	-	-
28	.055	.072343155	3.68816323	4934.32515	81.6265733
29	.056875	.0699582168	3.90182384	-	-
30	.05875	.0677255077	4.11465265	6027.13168	103.431306
31	.060625	.0656309044	4.32669751	-	-
32	.0625	.0636619772	4.53801613	7298.05654	127.869436

POT. ROTOR = 10.7149088
POT. LID. = 1.7133271 POT. UTIL = 1.70424384
ESCOAMENTO = .159057308
RENDIMENTO NA L. = 3290.24665 EM I=17
REND. NA L. = 114.483752 EM I=32
RENDIMENTO NA L. = 1189.80505 EM I=32

REFERENCE BIBLIOGRAPHY

1. Weiland, A.P. et al.; Physiologic Principles and Clinical Sequelae of Cardiopulmonary Bypass, *Heart & Lung*, 15(1) : 34-39, 1986.
2. Copeland, J.G. et al.; The Role of Mechanical Support and Transplantation in Treatment of Patients with End Stage Cardiomyopathy, *Circulation*, 72 (SUPPL. 13) : F 12, 1985.
3. Pennington, D.G. et al.; The Expanded Use of Ventricular Bypass Systems for Severe Cardiac Failure and as a Bridge to Cardiac Transplantation, *Heart Transplantation*, 3 (2) : 172-175, 1984.
4. Hill, J. D. et al.; Use of a Prosthetic Ventricle as a Bridge to Cardiac Transplantation for Postinfarction Cardiogenic Shock, *W. Engl. J. Med.*, 314 (26) : 625 - 628, 1986.
5. Jarvik, R. K.; The Total Artificial Heart, *Sci. Am.*, 244 () : 74-80, 1981.
6. Van Ditters, R. L.; The Artificial Heart - Progress, Problems, Prognosis, *W. Engl. J. Med.*, 145: 120-122, 1971.
7. Bernstein, E. F. et al.; Prolonged Mechanical Circulatory Support : Analysis of Certain Physical and Physiologic Considerations, *Surgery*, 57 (1) : 100 - 122, 1965.
8. Hesse, Y.; Totally Implantable Artificial Organ : Cardiac Prothesis, *Artif. Organs*, 10 (2) : 102 - 113, 1986.
9. Saxton, G. A. et al.; An Ideal Heart Pump with Hydrodynamic Characteristics Analogous to the Human Heart, *Trans. Am. Soc. Artif. Intern. Organs*, 6 : 1286-1260.

10. Bernstein, E. F. et al.: A Compact, Low Hemolytic, Per-
- Thrombogenic System for Non - Thoracotomy Prolonged
Left Ventricular Bypass, Trans. Am. Soc. Artif. Intern.
Organs, 20 : 643-654, 1974.
11. Lynch, M.F. et al.: Kinetic Heart Pumping, Minn. Med.,
67 (1) : 17-19, 1984.
12. Brann, G. et al.: A Free-Floating Body As the Rotor of
a Centrifugal Blood Pump for LVAD or TAH, Int. J.
Artif. Organs, 5 (3) : 161-162, 1982.
13. Richardson, P.D.: Blood Flow in Prosthetic Devices,
Sci. Prog. Oxf., 69 : 375-391, 1985.
14. Nagovern, G. J. et al.: Use of a Centrifugal Pump
without Anticoagulants for Postoperative Left
Ventricular Assist, World J. Surg., 9 : 25-36, 1985.
15. Olsen, D. B. et al.: Blood Pump with a Magnetically
Suspended Impeller, Trans. Am. Soc. Artif. Intern.
Organs, 31 : 395 - 401, 1985.
16. yozu, R. et al.: Experimental Results and Future
Prospects for a Nonpulsatile Cardiac Prosthesis, World
J. Surg., 9 : 116-127, 1985.
17. Nose, Y.: The Need for a Non-pulsatile Pumping System,
Artif. Organs, 12 (2): 113-115, 1988.
18. Kletschka, H. D. et al.: Artificial Heart III, Minn.
Med., 58 (10) : 757-781, 1975.
19. Birnbaum, P. L. et al.: Extracorporeal Circulatory
Assist Devices, Trans. Am. Soc. Artif. Intern. Organs,
33 : 190-193, 1987.
20. Johnston, G. G. et al.: Prolonged Pulseless Perfusion
in Unanesthetized Calves, Arch. Surg., 111 : 1225 -
1230, 1976.
21. Brann, G. et al.: Reduction of Coagulation and Hemolysis
by Sealless and Bearingless Blood Pump Systems for

- Long-Term Application, in Unger, F. (editor): *Assisted Circulation 2*, Springer-Verlag, pp. 175-176, 1984.
22. Pflaum, K.B.: Temporary Left Heart Assist for Open Heart Surgery Patients. *Minn. Med.*, 69 : 341-352, 1986.
 23. Thomas, H.: Drive and Management of Circulation Support Systems, in Unger, F. (editor): *Assisted Circulation 2*, Springer-Verlag, pp. 360-362, 1984.
 24. Unger, F. et al.: Orthotopic Heart Replacement by Nonpulsatile Axial Blood Pumps, *Artif. Organs*, 9 (1) : 65 - 68, 1985.
 25. Unger, F. et al.: Functional Heart Replacement with Nonpulsatile Assist Devices, in Unger, F. (editor): *Assisted Circulation 2*, Springer-Verlag, pp. 167-174, 1984.
 26. Affeld, K. et al.: Investigation of the Flow in a Centrifugal Blood Pump, *Trans. Am. Soc. Artif. Intern. Organs*, 32 : 269-273, 1986.
 27. Cahill, J.J. and al.: Hemolysis Caused by Pumps in Extracorporeal Circulation (In Vitro Evaluation of Pumps), *J. Appl. Physiol.*, 14 (6) : 1041-1044, 1961.
 28. Bernstein, E. F. et al.: Factors Influencing Erythrocyte Destruction in Artificial Organs, *Amer. J. Surg.*, 114 : 126-138, 1967.
 29. Musial, J. et al.: Evaluation of Surface - Bound Heparin and Platelet Inhibition in a Centrifugal Pump Left Ventricular Assist System, *World J. Surg.*, 9 : 72-77, 1985.
 30. Babesky, E. et al.: *Human Physiology*, Vol.1, Mir Publishers, Moscow, p. 56, 1985.
 31. Starkey, W. L. et al.: The Design and Development of a Cardiac Simulator for the Evaluation of Heart - Valve Prostheses, *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, 46 (2) : 207-211, 1963.

32. Streeter, V. L. et al.; *Mecânica dos Fluidos*, 7a. edição, Mc Graw-Hill, Brasil, 1982.
33. McNally, W.D. et al.; Review-Computational Methods for Internal Flows with Emphasis on Turbomachinery, Trans. ASME - Journal of Fluids Engineering, 107 : 8-22, 1985.
34. Mueller, T. J.; Application of Numerical Methods to Physiological Flows, in Wirz, H. et al. (editor); Numerical Methods in Fluid Dynamics, McGraw-Hill, pp. 89-154, 1978.
35. Roddy, P.J. et al.; Performance Characteristics of a Multiple-Disk Centrifugal Pump, Trans. ASME - Journal of Fluids Engineering, 109 : 54 - 57, 1987.
36. Rice, W.; An Analytical and Experimental Investigation of multiple Disk pumps and Compressors, Trans. ASME - Journal of Engineering for Power, 85 : 191 - 200, 1963.
37. Rice, W.; Analytical and Experimental Investigation of Multiple - Disk Turbines, Trans. ASME - Journal of Engineering for Power, 87(1) : 29-36, 1965.
38. Haslinger, S. H. et al.; Investigation of a Shear-Force Pump, Trans. ASME - Journal of Engineering for Power 85 : 201-207, 1963.
39. Boyd, K. E. et al.; Laminar Inward Flow of an Incompressible Fluid Between Rotating Disks, with Full Peripheral Admission, Trans. ASME - Journal of Applied Mechanics, 90 : 229-237, 1968.
40. Rice, W. et al.; Laminar Throughflow of Newtonian Fluid Between Rotating Cones, Trans. ASME - Journal of Applied Mechanics, 92(1) : 210-212, 1970.
41. Boyack, B. L. et al.; Integral Method for Flow Between Corotating Disks, Trans. ASME - Journal of Basic Engineering, 93 : 350-354, 1971.

42. Szeri, A. Z. et al.: Flow Between Rotating Disks, Part 1: Basic Flow, J. Fluid Mech., 104 : 129-137, 1983.
43. Pelech, I. et al.: Flexible Disk Rotating on a Gas Film Next to a Wall, Trans. ASME - Journal of Applied Mechanics, Dec. 1964, pp. 577-584.
44. Daily, J. W. et al.: Chamber Dimension Effects on Induced Flow and Frictional Resistance of Enclosed Rotating Disks, Trans. ASME - Journal of Basic Engineering, 82 : 217-232, 1960.
45. Churchill, S. W.: Friction - Factor Equation Spans All Fluid - Flow Regimes, Chemical Engineering, Nov. 1977, pp. 91-92.
46. Jones Jr., D.C.: An Improvement in the Calculation of Turbulent Friction in Rectangular Ducts, Trans. ASME - Journal of Fluids Engineering, 98 : 173-181, 1976.
47. Conte, S. D.: Elementos de Análise Numérica, 3a. edição, Ed. Globo, Brasil, 1977.
48. Bernstein, E. F. et al.: An Efficient, Compact Blood Pump for Assisted Circulation, Surgery, 68 (1) : 105-115, 1970.
49. Szeri, A. Z. et al.: Laminar Throughflow Between Closely Spaced Rotating Disks, J. Fluid Mech., 86 : 1-14, 1978.
50. Golding, L. A. R.: Centrifugal Pumps, in Unger, F. (editor): Assisted Circulation 2, Springer - Verlag, pp. 142-143, 1984.
51. Tomasek, J.: Velocity and Position Feedback in Brushless DC Servo Systems, Power Conversion Intelligent Motion, Aug. 1985, pp. 55-60.