

Bombando... (ou, mais corretamente, bombeando)

Por J. Fernando B. Britto
Mar/2025

Chamamos o ato de promover o escoamento forçado (por meio de dispositivos mecânicos) de fluidos de bombeamento e a ação propriamente dita de "bombear". Embora existam diferentes tipos de equipamentos que possam fazê-lo, neste artigo iremos nos concentrar no equipamento mais comumente utilizado no mercado, que são as motobombas centrífugas, as quais consistem em turbomáquinas de **deslocamento dinâmico**.

No **deslocamento positivo** o volume escoado depende do formato do dispositivo (volume das conchas, pás, baldes etc.), da velocidade de operação (rotação) e da disponibilidade de potência. Exemplo: a quantidade de água impulsionada por um elevador de canecas corresponde à quantidade de baldes (cheios) que circulam no sistema, por unidade de tempo.

Neste caso, a diferença de nível (deslocamento vertical, associado ao diferencial de pressão necessário) irá afetar a potência consumida (quanto maior o desnível, mais potência é requerida), sem acarretar mudança no volume total deslocado (vazão).

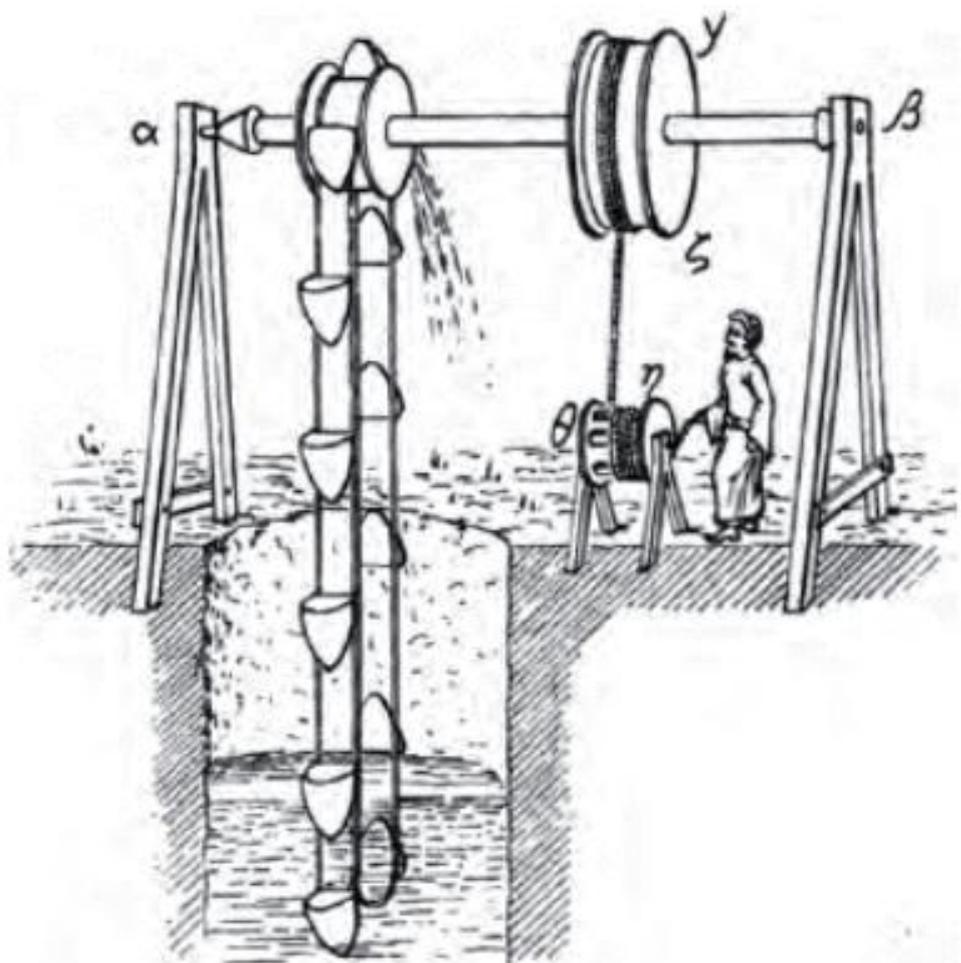


Figura 1 - Esquema representativo de um elevador de canecas.

Fonte: <https://vetraelevadores.com.br/historia/elevador-no-mundo/>

Já no **deslocamento dinâmico**, tanto a vazão, quanto o diferencial de pressão e a potência absorvida irão variar em função da rotação, seguindo uma relação conhecida como “Lei de Afinidade das Bombas”, apresentada a seguir:

$$\frac{V'}{V} = \frac{n'}{n} = \left(\frac{dp'}{dp}\right)^2 = \left(\frac{N'}{N}\right)^3$$

Onde: V: vazão
n: rotação
dP: altura manométrica
N: potência

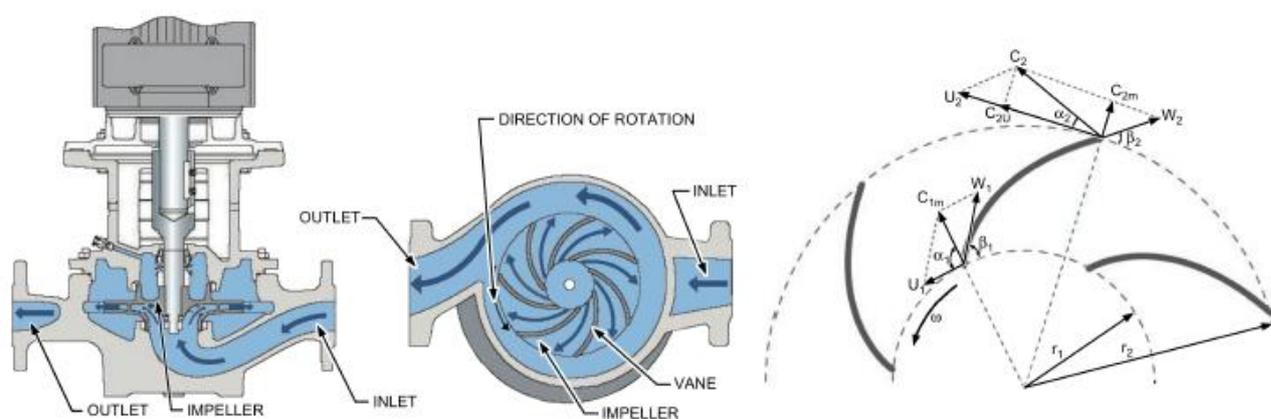


Figura 2 – Bomba centrífuga

Fonte: 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI) – Ch. 44

Neste tipo de equipamento, a força centrífuga causada pela velocidade angular do rotor expulsa o fluido através da borda de suas pás e a velocidade de giro na periferia das pás introduz energia de movimento ao fluido, conhecida como **pressão dinâmica** ou **pressão de velocidade**, a qual é convertida em energia potencial ao atingir o bocal de descarga da bomba, conhecida como **pressão estática** ou, no caso das bombas **altura manométrica**.

A ejeção do fluido no interior da bomba reduz a pressão em seu bocal de admissão e a pressão da atmosfera (em circuitos abertos) empurra fluido adicional para o interior da câmara do rotor, estabelecendo a continuidade do escoamento.

Em circuitos fechados, a lei da conservação da massa faz com que, após circular através do sistema, o fluido ejetado retorne ao bocal de admissão da bomba.

Como a conversão de pressão dinâmica depende da componente da velocidade do fluido no bordo de fuga das pás do rotor na direção do bocal da saída, também conhecida como **velocidade periférica**, então a altura manométrica (h) imposta pela bomba varia juntamente com a vazão (v), estabelecendo uma curva de desempenho de **h(v)**, dado por:

$$h = h_0 - k * V^2$$

Onde: V: vazão
h: altura manométrica
h₀: altura manométrica inicial (com V = 0)
k: coeficiente de resistência fluidodinâmica

conforme vemos na figura 3 a seguir:

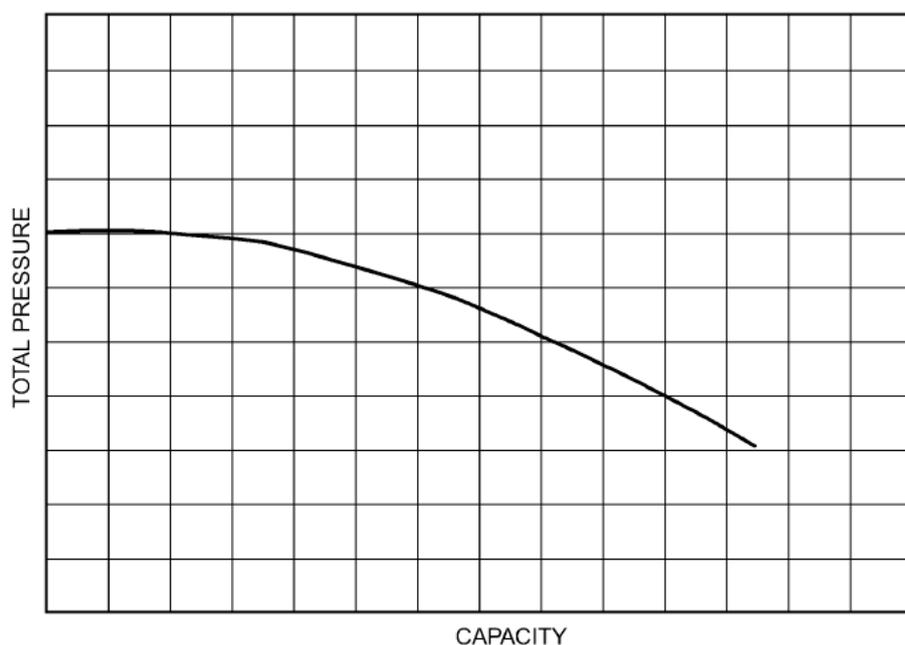


Figura 3 – Curva de desempenho típica de uma Bomba Centrífuga

Fonte: 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI) – Ch. 44

De modo semelhante, a altura manométrica requerida pelo sistema em que a bomba se encontra inserida, é expressa pela equação $h = k * V^2$, representada pela curva da figura 4 a seguir:

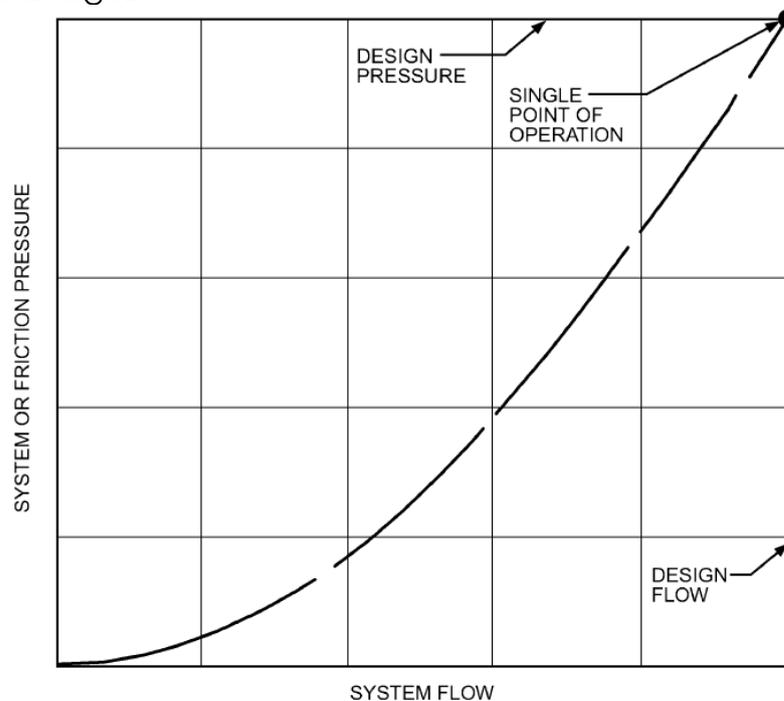


Figura 4 – Curva do sistema

Fonte: 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI) – Ch. 44

A intersecção das curvas do sistema e da bomba representam o ponto de operação ou seleção da bomba, como vemos na figura 5, a seguir:

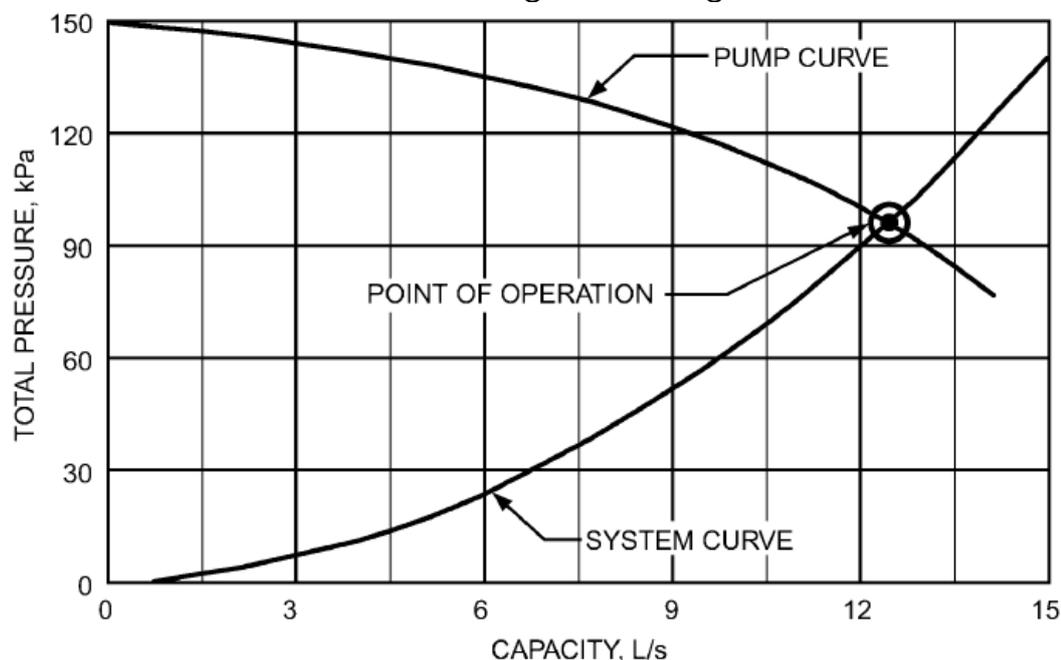


Figura 5 – Ponto de operação de uma Bomba Centrífuga

Fonte: 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI) – Ch. 44

Como vimos no artigo “ADF-24AT03 - Sistemas Primário e Secundário X Primário Variável e Síndrome do Baixo DT”, o escoamento nos sistemas de VAC-R varia em função da carga térmica e, visando economizar energia, sistemas de bombeamento modernos adotam rotação variável nas bombas, de forma a suprir o escoamento requerido pela carga térmica, dentro da tolerância de operação do *chiller* ou *heat pump*.

Segundo a “Lei da Afinidade das Bombas”, ao variar a rotação de uma bomba associada a seu sistema, sua vazão se modifica de forma diretamente proporcional, a altura manométrica oferecida varia de forma quadrática e a potência absorvida de forma cúbica, pois as curvas proporcionais à nova rotação interceptam a curva do sistema em outras posições, como verificado na figura 6, ao lado:

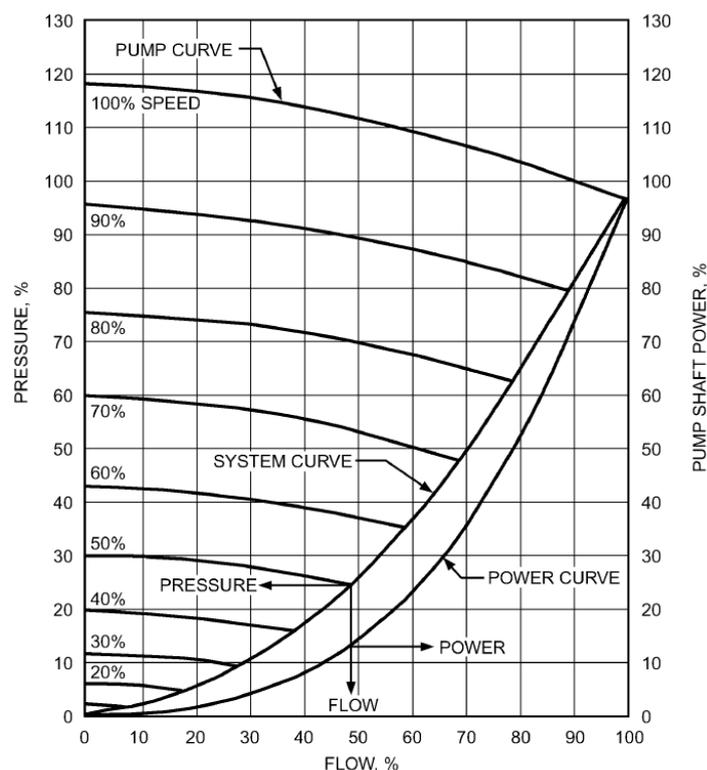
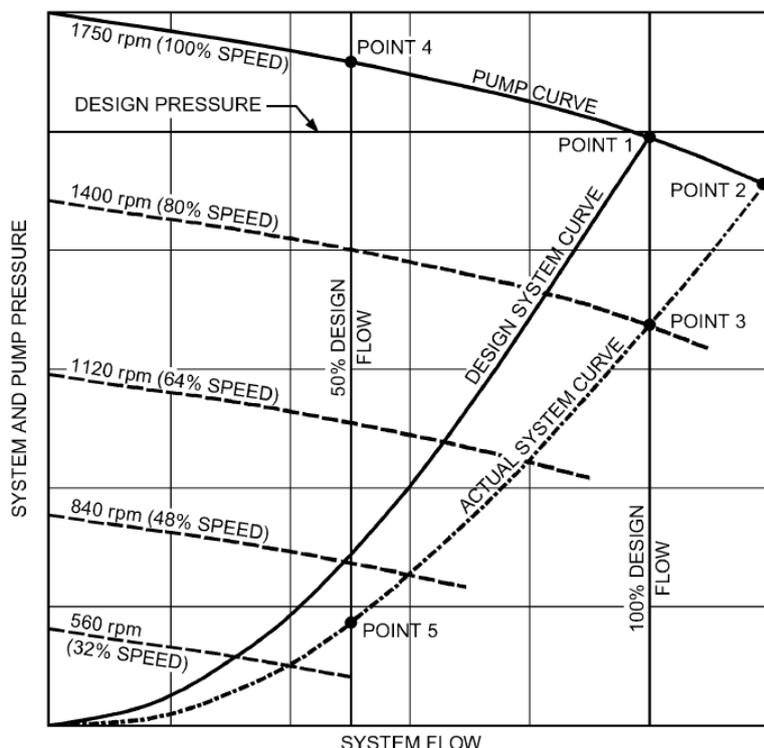


Figura 6 – Variação de desempenho de uma Bomba Centrífuga em função da rotação

Fonte: 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI) – Ch. 44



Como podemos verificar na figura 7 ao lado, a própria curva do sistema sofre variação, visto que seu coeficiente de resistência fluidodinâmica, correspondente à resistência equivalente imposta pelas resistências variáveis das válvulas de controle dos consumidores, sujidade nos filtros e eventuais incrustações ao longo dos componentes da rede hidráulica.

Figura 7 – Curvas do sistema e da Bomba Centrífuga em diversas condições

Fonte: 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI) – Ch. 44

E, frequentemente utilizamos associações de bombas em paralelo, seja devido aos elevados escoamentos ou por associação ao número de equipamentos de geração de utilidades (chillers, heat pumps, trocadores de calor etc.).

Nesta condição, utilizando bombas idênticas, cada uma oferece ao sistema uma parcela do escoamento, correspondente ao escoamento total dividido pelo número de bombas em operação, como vemos na figura 8:

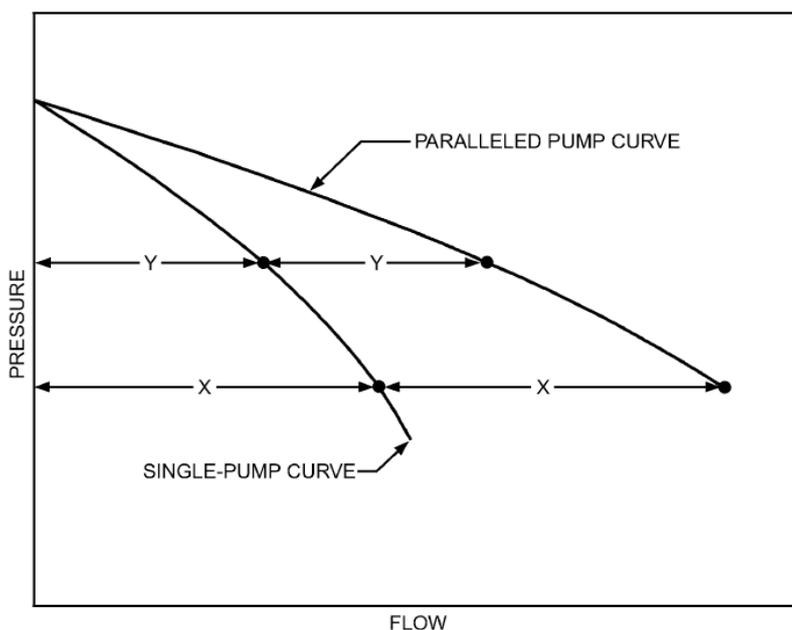


Figura 8 – Curvas do sistema e da Bomba Centrífuga em diversas condições

Fonte: 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI) – Ch. 44

Contudo, ao associarmos o conjunto de bombas em paralelo à curva do sistema, verificamos que o ponto de operação dado pelo cruzamento da curva do sistema com uma das bombas (ponto A e C) e com o conjunto de bombas (pontos B e D) continua obedecendo as equações do sistema e da bomba, o que impõe pontos de operação assimétricos com parte das bombas desativada, como vemos na figura 9, abaixo:

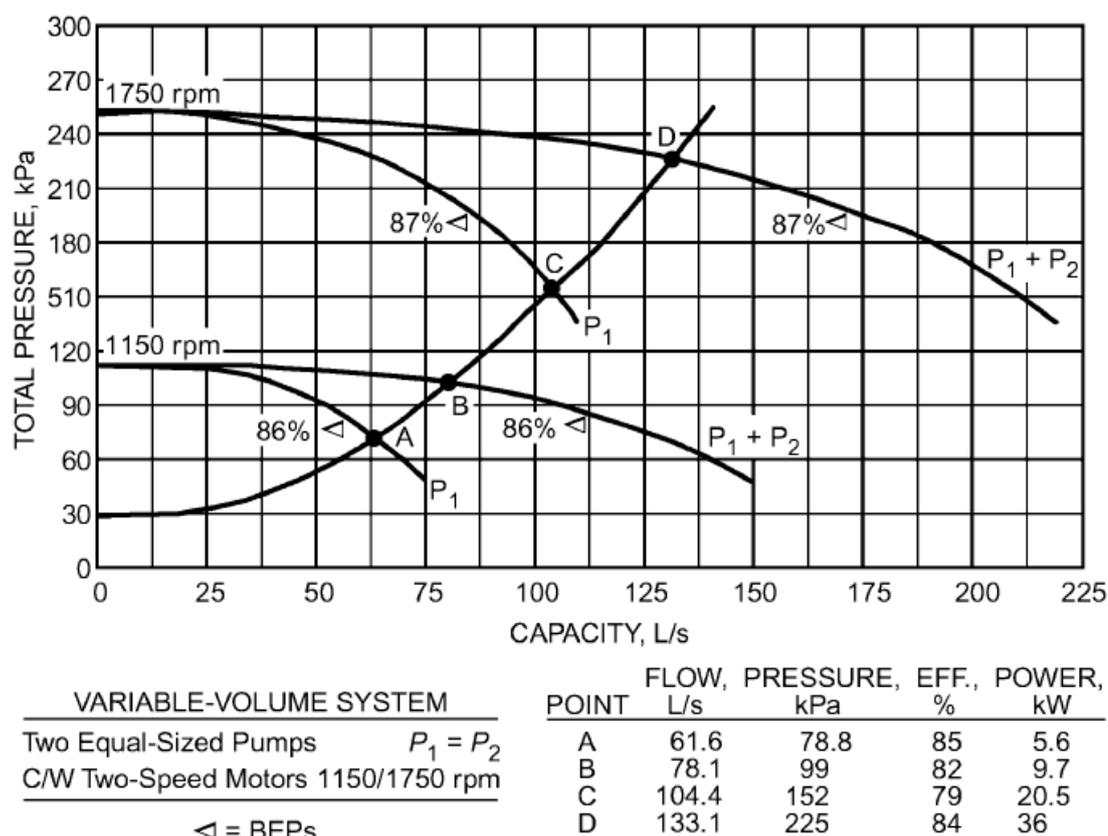


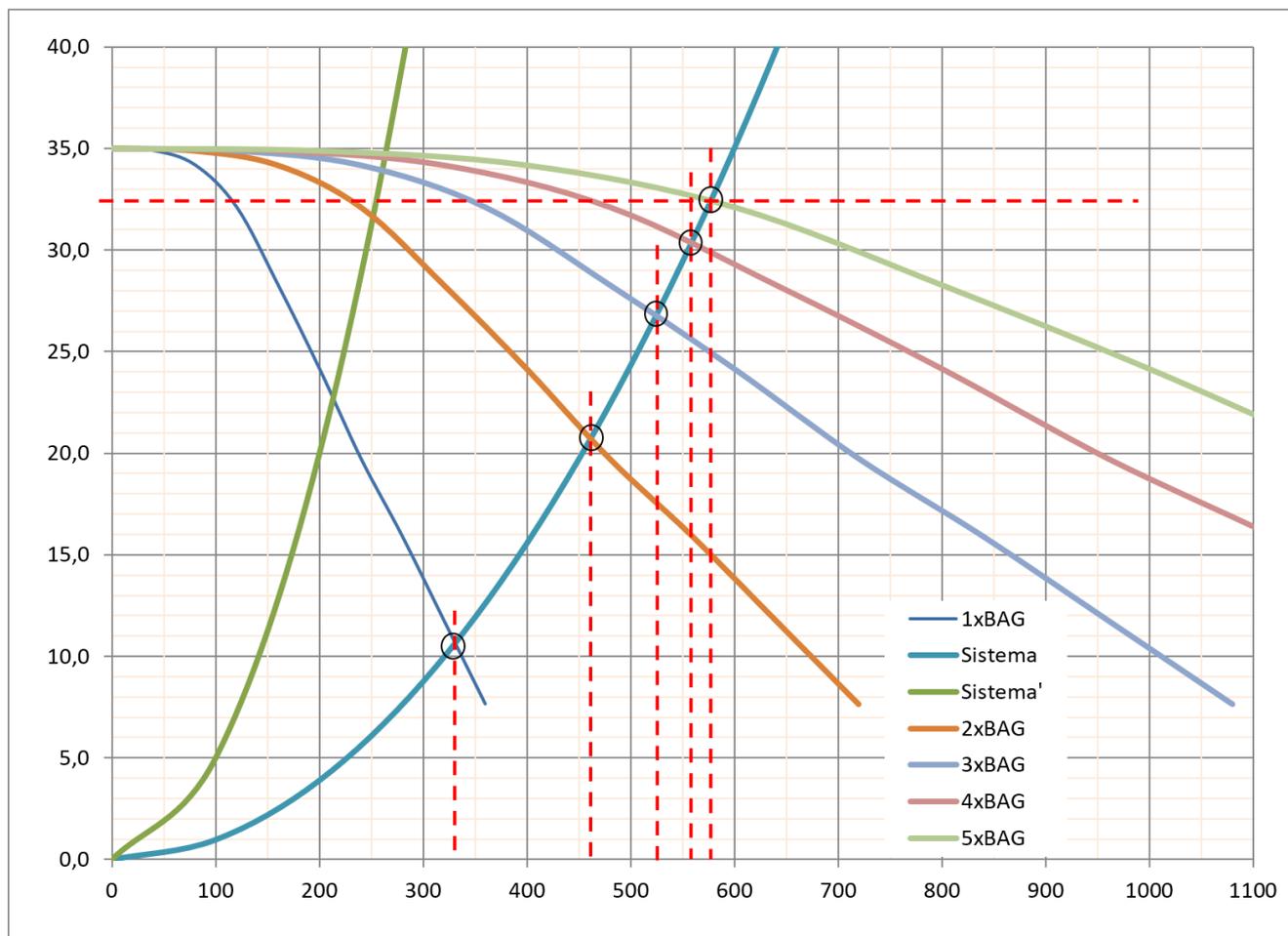
Figura 9 – Intersecção das Curvas do Sistema e da associação de Bombas em Paralelo

Fonte: 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI) – Ch. 44

Disso resulta que o acionamento da segunda bomba conectada ao sistema, produz uma variação de escoamento diferente (e muito inferior) ao esperado pela simples multiplicação dos escoamentos individuais, devido ao fato que o diferencial de pressão imposto pelo sistema varia de forma quadrática e intercepta a curva composta pela associação de bombas de forma não-linear.

Em função disso, o ponto de operação com número menor de bombas operantes que a condição de projeto do sistema, também intercepta a curva composta (ou simples) em pontos com rendimentos distintos da condição de operação à plena carga, com rendimentos distintos e impondo potências absorvidas diferentes da condição esperada para o ponto de operação de projeto de cada bomba.

Cabe observar ainda que uma quantidade crescente de bombas associadas em paralelo ao sistema, produz diferenças relativas de escoamento cada vez menores, a cada nova bomba acionada, como vemos no exemplo da figura 10, na próxima página:



Acréscimo de vazão para cada bomba adicional em paralelo

1xBAG	335	
2xBAG	455	136%
3xBAG	525	115%
4xBAG	558	106%
5xBAG	575	103%

Figura 10 – Intersecção das Curvas do Sistema e da associação de diferentes números de Bombas em Paralelo

No exemplo da figura 10, ao acionarmos duas bombas, a vazão aumenta em 36% com relação ao ponto de operação com uma única bomba, passando para 15% de acréscimo ao também acionarmos a terceira bomba, em relação à operação com as 2 bombas anteriores. Acionando a quarta (acréscimo de 6%) e a quinta (acréscimo de 3%) bombas, a variação no escoamento se torna pouco significativa, indicando que, para o sistema do exemplo, o aumento do número de bombas além das três primeiras é pouco eficaz.

Adicionalmente, cabe indicar que, estando todos os pontos de operação na mesma curva do sistema, todos os pontos de operação com diferentes números de bombas irão oferecer o mesmo rendimento mecânico, o que significa que a potência hidráulica requerida por cada bomba na operação com as 3 bombas do exemplo será muito maior que a requerida na operação com 5 bombas:

$$575 * 32,5 / (5 * 3,6 * 75) = 13,8 \text{ cv (cada; total = 69cv)}$$

$$525 * 26,8 / (3 * 3,6 * 75) = 21,1 \text{ cv (~62% maior cada; total = 63,3cv)}$$

OBS.: A afirmação “irão oferecer o mesmo rendimento mecânico” foi propositadamente indicada errada. Embora a potência hidráulica seja igual em qualquer ponto da curva, o rendimento mecânico da bomba depende de seu ponto de operação, como vemos na figura 11, abaixo:

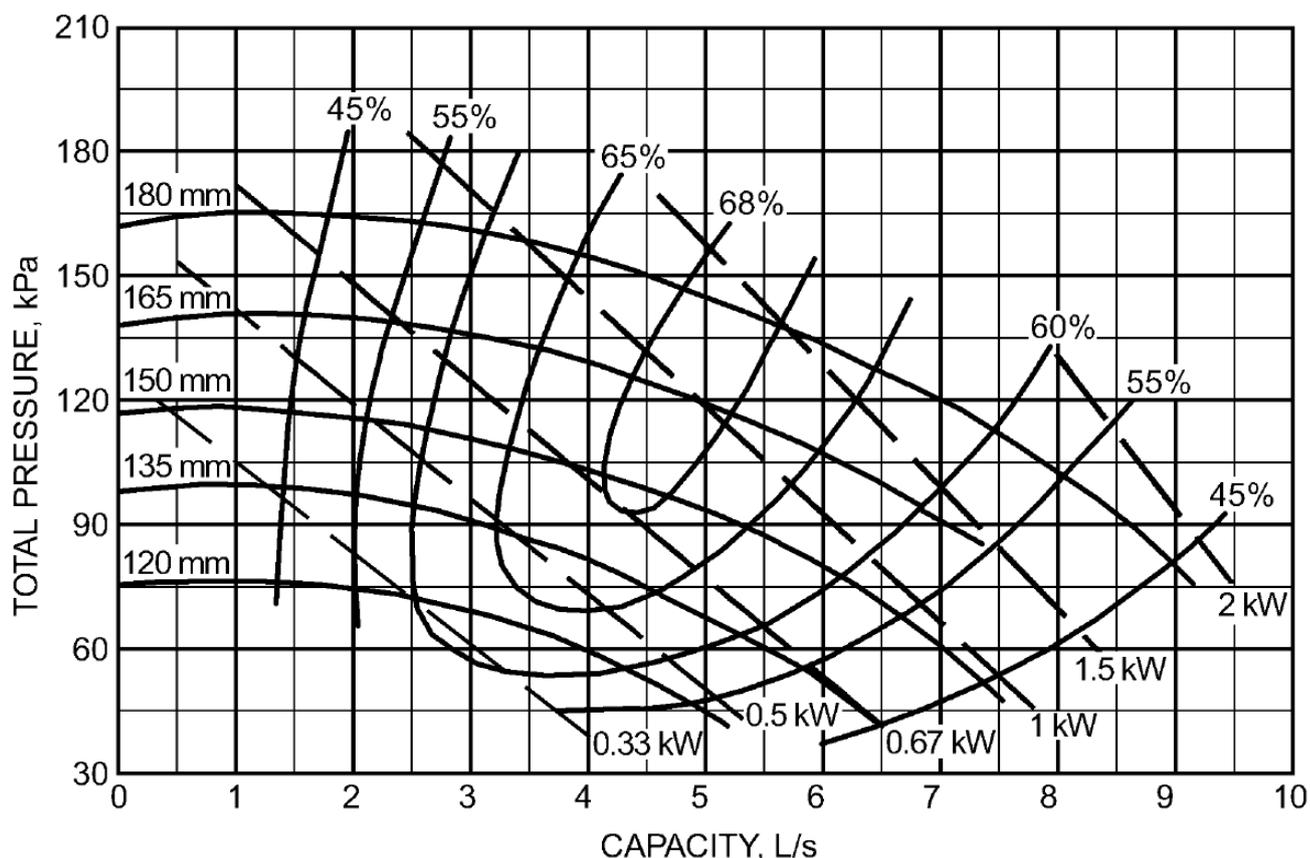


Figura 11 – Curva de desempenho típica de uma Bomba Centrífuga

Fonte: 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI) – Ch. 44

Ao oferecer 330 m³/h @ 10,5 mca, ao invés dos 115 m³/h @ 32,5 mca previstos no projeto da bomba, o rendimento mecânico da bomba será significativamente menor, resultando em potência absorvida muito maior.

Também cabe indicar que a potência instalada das bombas pode não suportar esse ponto de operação e serem limitadas por seu inversor ou desarmarem.

Ajustando a quantidade de bombas para obter o máximo rendimento, seria possível obter a vazão de projeto com aproximadamente o mesmo consumo total e operando com menor número de bombas, reduzindo significativamente os custos de aquisição.

Por outro lado, em caso de falha de uma das três bombas do exemplo, o sistema conseguiria operar com 85% da vazão de projeto, sob rotação de projeto e, com pequeno aumento de rotação, poderia atingir 90~93% da vazão de projeto, permitindo ao sistema operar de forma bastante segura, mesmo sem dispor de uma bomba reserva.

Igualmente importante, é a forma de controle de rotação das bombas para atender à variação de vazão do sistema.

O método de controle de rotação mais usual é a utilização de sistema operando com pressão constante. Embora nessa condição a resposta das válvulas aos escoamentos requeridos pelos consumidores possa ser mais rápida, verificamos na figura 12 (ao lado), que as válvulas de controle precisam impor resistências muito elevadas ao sistema que, devido à manutenção da pressão constante, admite pouca variação de rotação da(s) bomba(s):

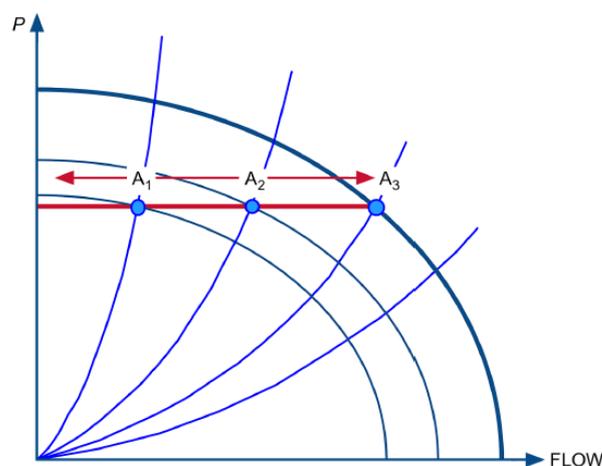


Figura 12 – Controle de rotação por pressão constante

Fonte: 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI) – Ch. 44

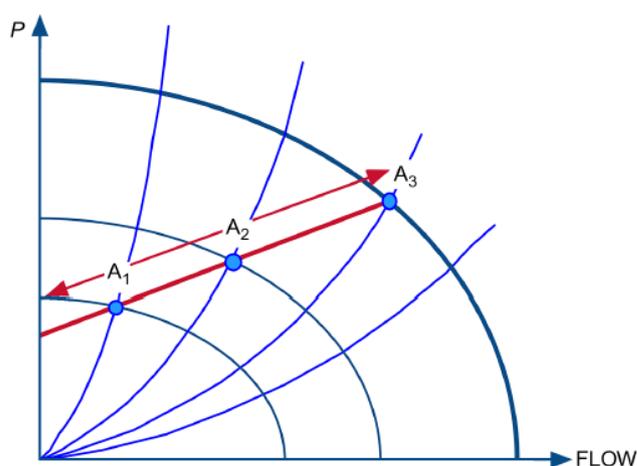


Figura 13 – Controle de rotação independente de pressão

Fonte: 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI) – Ch. 44

Em sistemas onde a vazão varia livremente, de forma independente da pressão, é possível operar com rotações significativamente menores, como demonstra a figura 13, ao lado. Isso permite reduzir ainda mais as demandas energéticas da instalação, além de se aumentar sua vida útil ao operar com rotações menores para obtenção do mesmo escoamento.

Por fim, mas não menos importante, cabe apresentar alguns desenvolvimentos na forma construtiva e no controle das bombas.

Atualmente, as motobombas horizontais com eixo montado sobre mancais e rotor em balanço (ditas: mancalizadas) acopladas ao motor por luvas elásticas, representadas na figura 14, têm sido substituídas por motobombas verticais com rotor balanceado e eixo acoplado por luva rígida, o que dispensa mancais e lubrificação, mantendo a possibilidade de vedação por selo mecânico (resfriado externamente ou pelo fluido circulante), conforme vemos na figura 15:



Figura 14 – Motobomba horizontal

Fonte: Armstrong Pumps®



Figura 15 – Motobomba vertical

Fonte: Armstrong Pumps®

A forma construtiva verticalizada, dispensa a utilização de bases de concreto, sendo sustentadas pela própria tubulação, tendo os esforços internos e o balanceamento dinâmico aprimorados de forma a reduzir vibrações.

A ausência de mancais também torna a bomba isenta de óleo (lembrando que o motor ainda possui mancais e requer lubrificação) e a luva de acoplamento rígido facilita a troca das vedações (selo mecânico) e o realinhamento do conjunto.

Outras inovações importantes são a utilização de motores de ímãs permanentes, dotados de sensores de vibração integrados, aumentando a eficiência do acionamento sob toda a gama de rotações possível, reduzindo o fator de potência e permitindo o monitoramento da vida útil dos rolamentos, além da integração dos inversores de frequência ao corpo do motor, os quais podem ser dotados de controladores incorporados, que além de permitir a integração direta ao BMS, podem oferecer algoritmos de controle de alta eficiência, como o "Paralel Sensorless®", oferecido pela Armstrong®.

Nesse algoritmo o fabricante introduziu os pontos de operação e rendimento de suas motobombas sob diversas rotações, permitindo através da "Lei de Afinidade das Bombas" e das curvas meticulosamente ensaiadas e calibradas individualmente em laboratório, conhecer em função da rotação, curva da bomba e potência oferecida pelo motor (medida pelo inversor), a vazão e a altura manométrica oferecidas por cada bomba acionada, avaliando o número de bombas e frequência de operação que oferecem o melhor desempenho e, ao medir variações de potência impostas pelo consumo do sistema (não associadas à variações de rotação da bomba), ajustar a rotação da(s) bomba(s) operante(s) para ajustar o escoamento até que o sistema se estabilize na nova condição requerida pelos consumidores, podendo ainda acionar ou desativar bombas associadas em função de melhores pontos de operação, tempo de operação, programação horária ou falha de uma das bombas.