

AGLOMERADOS VERDES DE SERVIDORES: CONTROLE ENERGÉTICO, MODELAGEM TÉRMICA E QUALIDADE DE SERVIÇO

Aluno: João Paulo Kalsing
Orientador: Carlos Valois Maciel Braga

Introdução

Os sistemas de *clusters* computacionais vêm se tornando mais comuns no ambiente das organizações, seja entre as de pequeno, de médio ou de grande porte, compreendendo desde sistemas de busca, comércio eletrônico até o processamento de dados de universidades. Essa disseminação, combinada com os avanços tecnológicos, acaba determinando aumento no consumo de energia, situação que estimula, como é o caso deste projeto, que se pesquise alternativas visando melhorar os níveis de eficiência dos sistemas de refrigeração dos *clusters* por meio do desenvolvimento de modelos termodinâmicos, com uma distribuição balanceada no arranjo geométrico do conjunto.

Para se ter uma idéia do problema, a demanda de pico dos *clusters* computacionais no em 2007 foi estimada em 7 (sete) gigawatts nos Estados Unidos, estimando-se que esse consumo salte para a casa de 12 (doze) gigawatts em 2011 [1] caso mantida a tendência verificada naquele ano.

Outro fato que sinaliza a dimensão do problema é que em 2006 somente os Estados Unidos tiveram um consumo de 59 bilhões de kilowatts hora (KWh) de eletricidade referentes aos Centros de Processamento de Dados (CPDs), a um custo de mais de 4 (quatro) bilhões de dólares, sem falar nas consideráveis emissões de dióxido de carbono (CO₂) e no custo de energia para a refrigeração desses *clusters*, estimado em pelo menos a metade do custo total [2].

Diante da previsão de elevação no consumo, um fato importante a ser considerado é que um volume relevante da energia utilizada para alimentar os *clusters* se perde no processo, na medida em que os sistemas são projetados para assegurar qualidade dos serviços quando demandados na capacidade máxima. Normalmente, os *clusters* computacionais operam somente na faixa de 20% a 30% da capacidade, ficando ociosos na maior parte do tempo.

Pesquisas recentes mostram que o Gerenciamento Térmico Dinâmico (GTD) em um arranjo geométrico dos *clusters* influencia diretamente na dissipação de energia, na forma de calor, dos elementos que compõem um servidor e, portanto, na redução ou elevação do consumo da mesma [3].

Questão fundamental, ainda que normalmente não observada, se encontra no consumo significativo de energia decorrente do processo de refrigeração dos servidores

dos aglomerados [4], cuja densidade energética gera valores de calor a serem retirados do ambiente. Por esse motivo, a área de Gerenciamento Térmico em sistemas de computação tem recebido atenção crescente visando a redução de gastos com o resfriamento, eis procura otimizar as operações dos equipamentos responsáveis por esse processo e gerar, como resultado, uma maior eficiência energética. Na literatura especializada, é possível encontrar um grande número de trabalhos nos ambientes acadêmico e empresarial.

O problema do resfriamento se mostra particularmente importante em países tropicais como o Brasil, onde a variação da temperatura externa se situa acima da faixa de 20° a 25° Celsius recomendados para o interior de CPDs. Um CPD é usualmente composto por uma sala de servidores, montados em bastidores (*racks*) contendo ventiladores e diversos outros dispositivos. Cada sala pode dispor diversos desses bastidores com diferentes classes de servidores, cada qual com a sua respectiva demanda energética. Segundo Pakbaznia e Ghasemazar [5] um Centro de Processamento de Dados da Google, por exemplo, dispõe de diversos tipos de servidores, entre eles os servidores Web, os de índice de dados e os servidores de documentos. Os servidores de índice, responsáveis pela busca rápida de informações no banco de dados, requerem uma maior velocidade e potência dos seus processadores sendo, portanto, os que mais demandam energia.

Neste projeto de pesquisa investigaremos o princípio de que variações na geometria dos bastidores e na quantidade de componentes presentes (adensamento) podem alterar o fluxo de ar, implicando em alterações na temperatura. Também estudaremos formas de reduzir os custos operacionais ao tornar o processo de refrigeração mais eficiente e sustentável.

Levando em consideração que a crescente dependência da sociedade em relação aos sistemas computacionais requer que sejam desenvolvidas novas técnicas (produtos e serviços) envolvendo componentes energeticamente mais eficientes, a proposta de se desenvolver pesquisa nos termos aqui propostos se mostra econômica e ambientalmente justificada.

Objetivos

Investigar métodos e desenvolver sistema de gerenciamento térmico eficiente para aglomerados de servidores, de forma que se ofereçam soluções para a adequação do consumo energético sem perdas de qualidade de serviço, e para a gestão térmica dos servidores nos respectivos espaços físicos.

Adicionalmente, pretende-se desenvolver modelos termodinâmicos para simulação de comportamentos e elaboração de análises.

Metodologia

Sem ser dispensada a utilização de instrumentos de investigação que se mostrarem mais apropriados no curso do estudo, *a priori* foram utilizadas fontes de

pesquisa de domínio público, característica aplicável às pesquisas com o uso de meios bibliográficos conforme definido por Vergara [6].

Com essa orientação metodológica, foram realizadas consultas na literatura técnico-científica buscando ampliar a compreensão do problema e avaliar os sistemas já existentes implantados em CPDs no Brasil e nos Estados Unidos. Nessas consultas foi identificado o software Mercury [7], desenvolvido na Rutgers University, de Piscataway, New Jersey, que consiste em um emulador de temperatura baseado em gerenciamento térmico que simula comportamentos termodinâmicos em sistemas de servidores com o uso de parâmetros reais. Foram elaborados estudos focados nesse programa para analisar a possibilidade de vir a ser implementado como instrumento de simulação em nossos experimentos.

Com base nesses estudos, foram destinados recursos – físicos e temporais – na tentativa de adequar o software à realidade deste projeto de pesquisa. Testes foram realizados a fim de compreender o funcionamento do sistema e, a partir disso, manipular os *scripts* visando adaptá-lo ao modelo simples de CPD que se tem como proposta neste estudo. Como resultado, alguns dificultadores surgiram, entre eles:

- compreensão das linhas de comandos do script do programa;
- manipulação dos comandos e variáveis de autoria do desenvolvedor, em grande parte desconhecidos pelos pesquisadores;
- realização de testes com a estipulação de valores de grandeza razoáveis;
- saídas de extrema complexidade geradas pelo *software*; e,
- limitação de meios de contatos com o desenvolvedor -- exclusivamente via e-mail – dificultaram o suporte à dúvidas e questionamentos dos pesquisadores.

Diante do elenco de dificuldades, que determinaram que o tempo dedicado não estava resultando em condições viáveis para o estudo, decidiu-se pelo abandono ao software Mercury. Consequentemente, foi retomado o processo de revisão bibliográfica abordando os mesmos problemas da pesquisa. Desenvolveu-se, então, um modelo termodinâmico simples, para que fosse estudado e compreendido melhor o comportamento de uma sala de *clusters*, bem como o aprimoramento do seu sistema de refrigeração. O modelo termodinâmico que se passou a investigar baseia-se no funcionamento de um Centro de Processamento de Dados moderno, conforme mostra a Figura 1.

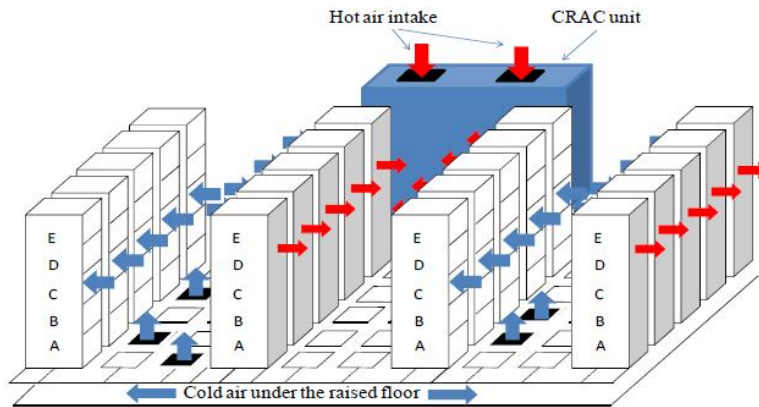


Figura 1 - Modelo moderno de um CPD com ar frio (Cold Air) injetado na sala e rejeitado ar quente (Hot Air)
Fonte: Pakbaznia *et al* (2010)

Nesse caso, ar frio é gerado por um sistema de ar condicionado central, o CRAC (*Computer Room Air Conditioning*), que então é escoado e injetado na sala por orifícios existentes no piso. Por convecção forçada [8], é dado o resfriamento dos elementos dos *clusters* e o ar quente proveniente dessa rejeição de calor é extraído da sala.

Na montagem acima ilustrada, estudos de Tang *et al* [2] e Sharma *et al* [9] apontam para a formação de uma recirculação de ar na parte superior da sala, conforme demonstrado esquematicamente na Figura 2 a seguir,

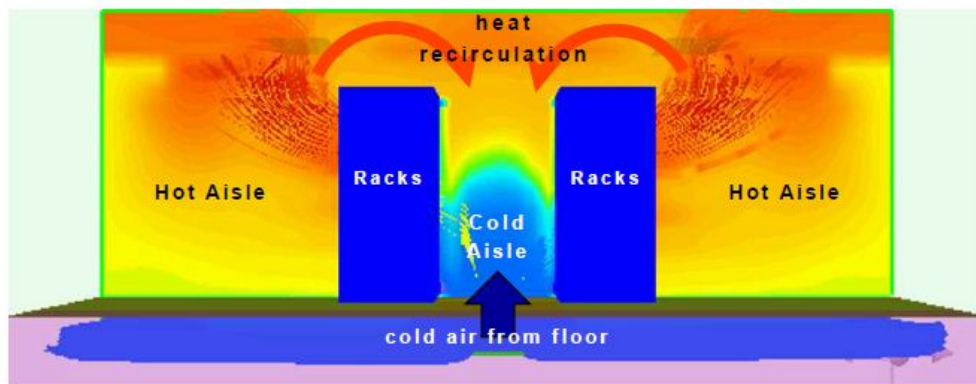


Figura 2 - Recirculação de ar em CPDs (TANG, GUPTA e VARSAMOPOULOS).
Fonte: Tang *et al* (2008)

Essa recirculação interfere diretamente na eficiência energética dos CPDs, uma vez que o calor produzido pelos *clusters* gera “pontos quentes” na sala e obstaculizam as entradas de ar frio. Esse problema obriga a fonte de refrigeração fornecer ar para a sala a uma temperatura mais baixa se comparada com a situação ideal (sem recirculação). Em outras palavras, essa situação leva o CRAC a operar com um menor Coeficiente de *Performance* (COP).

Tal problema foi considerado no presente projeto, na medida em que se procura reduzir ao extremo esses espaços ou mesmo eliminá-los por completo do modelo em estudo.

Experimento

Partindo dos conteúdos pesquisados, elaborou-se um modelo físico próprio para cálculos e análise, adiante ilustrado na Figura 3. Nele, conforme antes observado, os espaços entre máquinas, paredes e teto estão bastante minimizados, reduzindo os efeitos de recirculação de ar quente. Vale ressaltar que as tubulações possuem isolamento térmico para evitar a troca de calor com o ambiente. A idéia é aproximar ao máximo a situação do modelo para um caso ideal.

1. Teoria

O funcionamento básico do modelo em questão está no trabalho de um ciclo fechado, demonstrado na Figura 3, com a presença de um *Chiller*, que resfria o ar quente escoado pelas tubulações até ele. O ar frio resultante é injetado na sala com o auxílio de uma ventoinha, que atua como uma bomba. Com o resfriamento, tem-se uma rejeição de calor que é capturada e escoada novamente até o *Chiller*, onde o ciclo é então repetido.

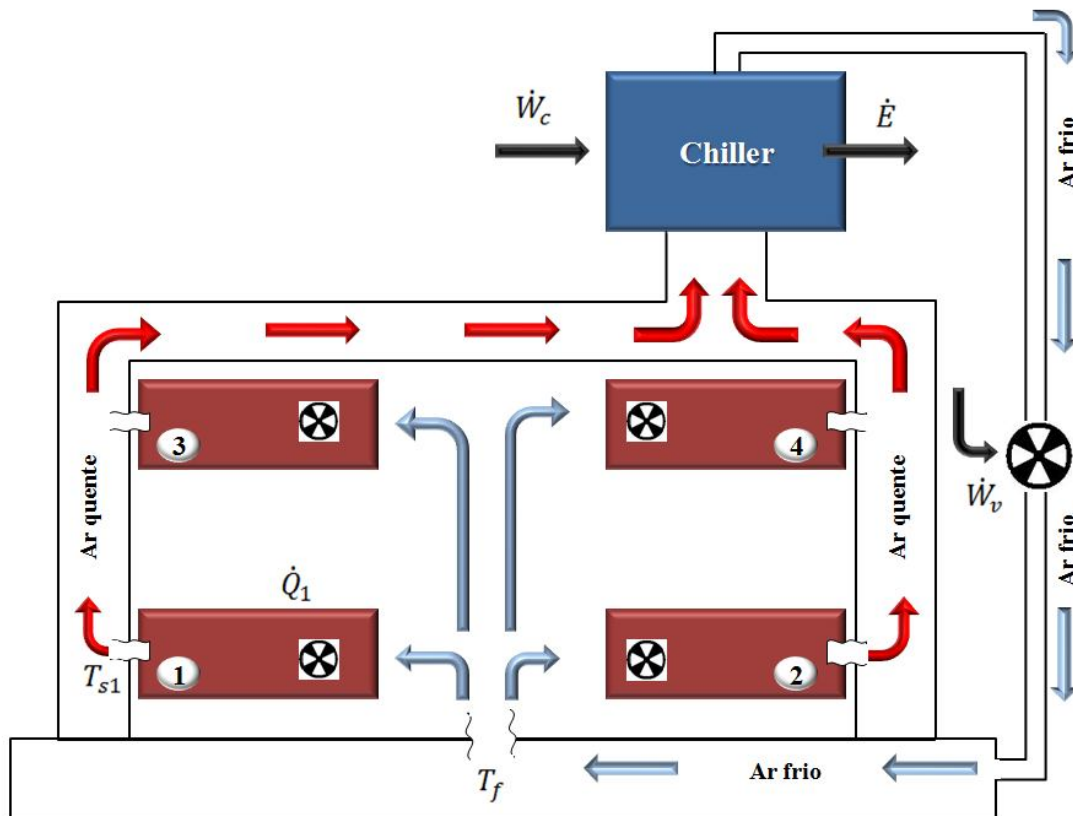


Figura 3 - Modelo Físico de um CPD para estudo.
Fonte: elaborado pelo autor e orientador

O *Chiller*, juntamente com a ventoinha de “bombeamento”, é o elemento onde o trabalho fornecido deve ser minimizado, a fim de se conseguir a diminuição do consumo de energia e obter ganhos de eficiência do sistema. Importante destacar que a eficiência do processo de resfriamento depende de inúmeros fatores, entre eles a substância usada no *Chiller* (fluido refrigerante) e a velocidade que o ar é “bombeado”

[5]. Para esse estudo, foi equacionado o modelo físico por meio de leis da Termodinâmica e da Mecânica dos Fluidos [8] [10].

Realizando a análise de apenas uma máquina, para posteriormente o estudo ser expandido para uma sala composta por outros equipamentos, da Termodinâmica é sabido que o trabalho instantâneo de cada máquina é dada por:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar} \cdot C_{p_{ar}} \cdot \Delta T \quad (1)$$

Onde \dot{m}_{ar} é a vazão mássica de ar nas tubulações, $C_{p_{ar}}$ é o calor específico do ar (assumido como constante com valor 1.004) e ΔT é a diferença de temperatura de ar quente e ar frio ($T_s - T_f$). Fixando valores estimados para a potência e temperatura na saída dos *clusters*, bem como valores para a vazão mássica, a temperatura de ar frio T_f pode ser isolada na equação e então se obter um resultado respectivo a cada combinação de parâmetros.

Conforme demonstrado nos estudos de Tang *et al* [2] e Pakbaznia *et al* [5], o Coeficiente de Performance (COP) é uma função dependente do valor da temperatura de ar frio (T_f), como a seguir:

$$COP(T_f) = (0.0068T_f^2 + 0.0008T_f + 0.458) \quad (2)$$

A partir disso é possível determinar também o valor para a potência do *Chiller* necessária ao resfriamento \dot{W}_c , utilizando-se da equação:

$$\dot{W}_c = \frac{\dot{E}}{COP} \quad (3)$$

Onde \dot{E} é igual ao somatório das potências das máquinas que estão em funcionamento ($\Sigma \dot{Q}$).

Após ser encontrado o valor para o trabalho instantâneo a ser fornecido para o processo de resfriamento, o próximo passo é determinar a potência de “bombeamento” de ar, para que então possa ser feito um estudo a fim de que sejam otimizados esses valores. A potência fornecida à ventoinha \dot{W}_v pode ser determinada pela equação:

$$\dot{W}_v = \dot{V} \cdot \Delta P \quad (4)$$

Onde \dot{V} é a vazão volumétrica de ar e o ΔP é o diferencial de pressão. Ambos têm que ser previamente determinados, da seguinte forma:

- A vazão volumétrica é dada pela razão da vazão mássica pela área da tubulação de escoamento do ar. Para os cálculos da área, foram dados valores para medidas aproximadas de tubulações frequentemente utilizadas.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_{ar}}{A} \quad (5)$$

- O cálculo do diferencial de pressão é um trabalho um pouco mais complexo. Deve-se tomar como princípio alguns fundamentos da Mecânica dos Fluidos, como o número de Reynolds e equações que regem quedas de pressão.

$$Reynolds \rightarrow Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (6)$$

Onde ρ , \bar{V} e μ são respectivamente a densidade, a velocidade de escoamento e a viscosidade dinâmica do ar e D é o diâmetro do tubo circular por onde o ar é escoado.

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (7)$$

$$\Delta P = 32 \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\mu \bar{V}}{D} \quad (8)$$

As equações 7 e 8 acima referem-se às situações de regime turbulento e regime laminar, respectivamente. Para saber qual equação usar, leva-se em consideração um valor para o número de Reynolds que é transitório aos regimes. Uma boa faixa de valor para determinar a transição do regime em que escoar um fluido em uma tubulação são números entre 2100 e 2400 Reynolds. Para valores abaixo de 2100, o regime pode ser assumido como laminar, já acima de 2400 assume-se como turbulento. Em caso de turbulento, deve-se determinar um valor para o fator de atrito f pelo diagrama de Moody, reproduzido no Anexo 1 a este projeto.

Com os valores dos trabalhos instantâneos de resfriamento e de “bombeamento” de ar, se obtém a potência total que é fornecida ao sistema. Ela é a nossa “conta à pagar” e, como já foi ressaltado, é nela que está o foco em minimizar.

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_c + \dot{W}_v \quad (9)$$

2. Cálculos

A etapa de cálculos ainda está sendo realizada. Valores relevantes, tais como a área transversal da tubulação, a vazão mássica de ar que normalmente apresenta esses tipos de componentes bem como os parâmetros energéticos das máquinas estão sendo pesquisados a fim de saber quais são essas grandezas normalmente usadas nesses tipos de instalações. Com isso, será possível estabelecer uma série de simulações para que se descubra uma combinação ótima dos parâmetros, a fim de reduzir o consumo e aumentar a eficiência energética do modelo.

Conclusões

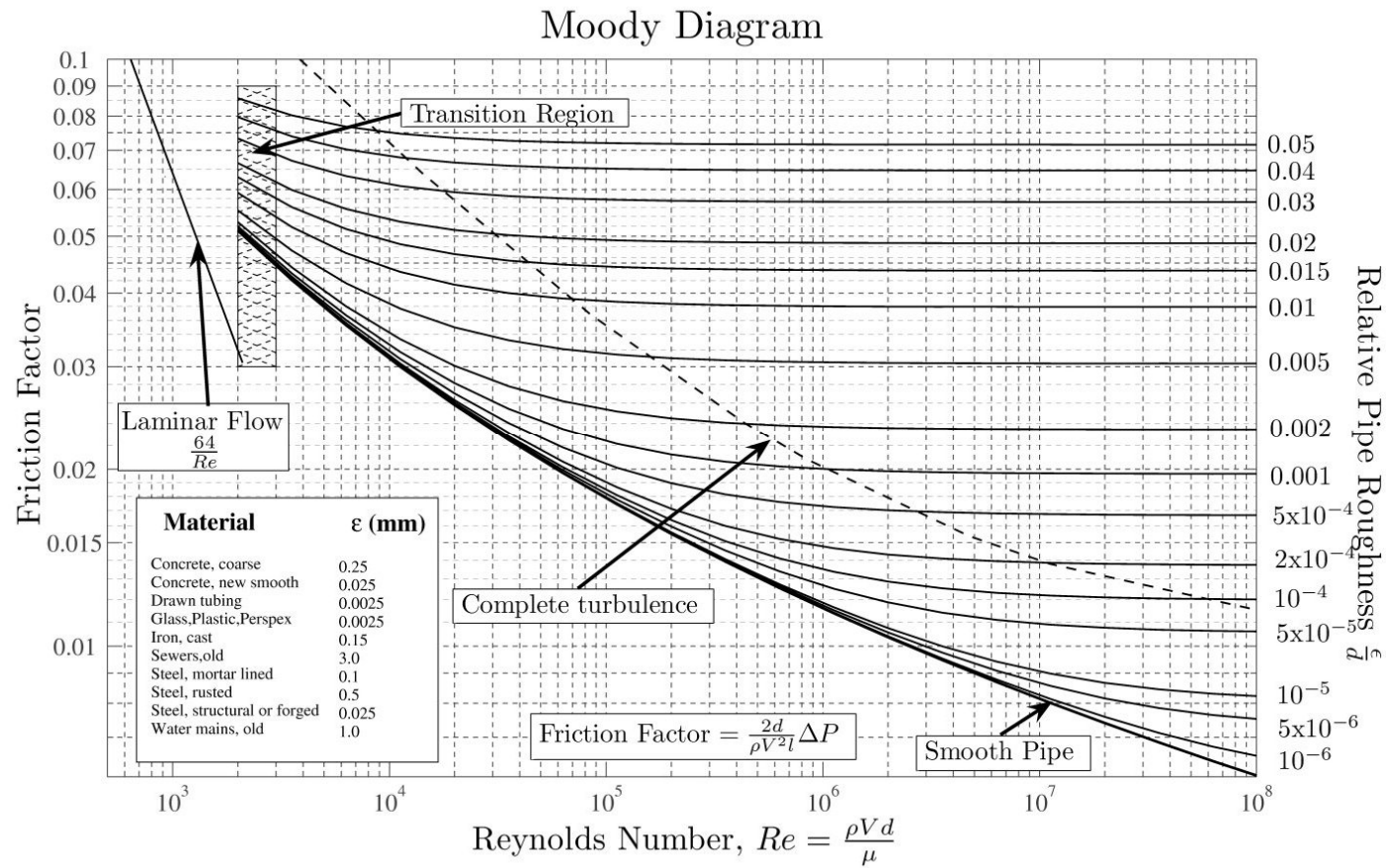
Apesar de não se ter ainda nenhum resultado concreto, foi possível aprimorar o estudo focado nas soluções para os problemas de eficiência nos CPDs. O período de validação e de testes realizados com o software Mercury, apesar de este ter sido abandonado posteriormente, serviu para adquirir uma base teórica importante ao serem consultados artigos relacionados ao assunto. Com o desenvolvimento do nosso próprio modelo, foi dado um passo importante ao ser estabelecida a sua modelagem física, por meio das leis Termodinâmicas e Mecânicas dos Fluidos. Com isso, o presente trabalho dará continuidade à pesquisa, para que os próximos passos sejam efetuados e o objetivo seja alcançado.

Referências

- [1] EPA - United States Environmental Protection Agency (EPA). **Report to Congress on server and data center energy efficiency**. August 2, 2007. Disponível em: <www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/downloads/EPA_Report_Exec_Summary_Final.pdf>. Acesso em: 29 jun 2011.
- [2] TANG, Qinghui; GUPTA, Sandeep K.S.; VARSAMOPOULOS, Georgios. **Energy-Efficient, Thermal-Aware Task Scheduling for Homogeneous, High performance Computing Data Centers: a cyber-physical approach**. V. 19, Nr. 11, p. 1458-1472, November 2008. Disponível em: <www.computer.org/portal/web/csdl/doi/10.1109/TPDS.2008.111>. Acesso em: 27 jun 2011.
- [3] HUANG, Michael; RENAU, Jose; YOO, Seung-Moon; TORRELLAS, Josep. **A Framework for Dynamic Energy Efficiency and Temperature Management**. In: International Symposium on Microarchitecture, 10-13 December 2000, Monterey, California, USA.
- [4] WOODS, Andy. **Cooling the Data Center**. Communications of the ACM, V.53, Nr. 4, p.36-42, April 2010. Disponível em: <http://delivery.acm.org/10.1145/1730000/1721671/p36-woods.pdf?ip=177.17.24.254&CFID=31895400&CFTOKEN=53424748&__acm__=1309441094_8fb44e213162aa259b49cf05e947c8fe>. Acesso em: 28 jun 2011.
- [5] PAKBAZNIA, Ehsan; GHASEMAZAR, Mohammad; PEDRAM, Massoud. **Temperature-Aware Dynamic Resource Provisioning in a Power-Optimized Datacenter**. In: Design, Automation, and Test in Europe, p.124-129, 2010. Disponível em: <atrak.usc.edu/~massoud/Papers/resprov-datacenter-date10.pdf>. Acesso em: 26 jun 2011.
- [6] MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Técnicas de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.
- [7] HEATH, Taliver; CENTENO, Ana Paula; GEORGE, Pradeep; RAMOS, Luiz; JALURIA, Yogehs; BIANCHINI, Ricardo. **Mercury and Freon: Temperature Emulation and Management for Server Systems**. In: ASPLOS'06, San Jose, California, October 21-25, 2006. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.77.1815&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em 29 jun 2011.
- [8] BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7ma Edição. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.
- [9] SHARMA, Ratnesh K.; BASH, Cullen E.; PATEL, Chandrakant D.; FRIEDRICH, Richard J.; CHASE, Jeffrey S. **Balance of Power: dynamic thermal management for Internet data centers**. HP Laboratories Palo Alto, HPL 2003-5, Feb 18, 2003. Disponível em: <<http://www.hpl.hp.com/techreports/2003/HPL-2003-5.pdf>>. Acesso em: 29 jun 2011.
- [10] FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; MCDONALD, Alan T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7ma Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

[11] VÁSIC, Nedeljko; SCHERER, Thomas; SCHOTT, Wolfgang. ***Thermal-Aware Workload Scheduling for Energy Efficient Data Centers***. In: 7th IEEE/ACM International Conference on Autonomic Computing and Communications, Washington, June 7-11, 2010. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1809076>>. Acesso em: 28 jun 2011.

Anexo 1 - Diagrama de Moody



Fonte: Fox et al (2010)