Uso Eficiente da Energia em Sistemas Distribuídos

Lesandro Ponciano

https://orcid.org/0000-0002-5724-0094

Por que devo me preocupar com o consumo de energia?





Não basta construir novas hidrelétricas ou utilizar outras fontes limpas de geração de energia?





Adeus a Sete Quedas

"(...)

Sete Quedas por nós passaram e não soubemos amá-las e todas sete foram mortas, e todas sete morrem no ar, sete fantasmas, sete crimes dos vivos golpeando a vida, que nunca mais renascerá."



Carlos Drummond de Andrade In *Jornal do Brasil*, *Caderno B* 09/09/1982



A questão ambiental não está sozinha ...



globo.com notícias esportes entretenimento vídeos





Minas Gerais



Editorias >

Economia Seu estado V Telejornais V Serviços V

VC no G1 ~

04/2011 16h11 - Atualizado em 05/04/2011 16h32

Conta de luz vai ficar mais cara em Minas Gerais a partir de sexta-feira

Aneel aprovou reajuste de 6,61% para residências. Para as indústrias mineiras, o aumento é de 9,02%.

Existem diversas motivações para aumentar a eficiência energética

dos sistemas distribuídos





Objetivos do minicurso

- Apresentar os principais conceitos relacionados à gerência de energia de computadores
- Discutir estratégias de gerência de energia em Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos
 - ∘ Ênfase em:
 - Software
 - Redes Iocais e Grades Computacionais
 - Fora do escopo:
 - Redes de sensores
 - Computação móvel e afins

Exemplo de Problema

Uma empresa possui 300 computadores de mesa. Geralmente, os usuários técnicos e especialistas acessam esses computadores remotamente. Em razão disso, os computadores permanecem sempre ligados para que a conectividade seja mantida. No último levantamento de custos, a empresa constatou que o consumo de energia desses computadores representa 60% do seu orçamento de TI e definiu que esse custo precisa ser reduzido para menos de 30%. Cabe ao departamento de TI propor uma solução.

Exemplo de Problema

- Que solução em software você desenvolveria/proporia para economizar energia e ainda manter a conectividade?
- Em que situações essa solução possibilitaria economia de energia?
- Quais os custos associados à economia de energia?

Organização do Minicurso

- Conceitos de gerência de energia
- Especificações de gerência de energia em computadores
- Estratégia de gerência de energia em computadores
- Gerência de energia em Redes de computadores
- Gerência de energia em Grades Computacionais

Conceitos de Gerência de Energia



O que é gerência de energia?

- O termo gerência de energia, também tratado como gerenciamento de energia, tem sido usado em diversos contextos, como:
 - Controle do consumo de energia
 - Gestão de subestações
 - Monitoramento de fontes de energia ou nobreaks
- Neste minicurso utilizamos o gerência de energia com o sentido de controle do consumo de energia em computadores

Gerência de energia

- O que faz?
 - Controla o estado de energia em que cada recurso deve operar em cada instante de tempo
 - ex: Hibernação, Standby
 - Decide quais recursos devem mudar de estado e em que condições essa mudança deve ocorrer

Gerência de Energia

- Quais os objetivos da gerência de energia?
 - Reduzir o aquecimento
 - Atender a um orçamento de energia
 - Reduzir custos
 - o entre outros

 Em algumas situações esses objetivos podem ser conflitantes

Objetivos conflitantes

Exemplo:

- Reduzir a potência do sistema para reduzir o aquecimento ou para atender um orçamento de energia pode implicar em uma redução do desempenho do sistema.
- Essa redução de desempenho pode levá-lo a gastar mais tempo para executar a tarefa e, em razão disso, consumir mais energia

Consumo de energia elétrica

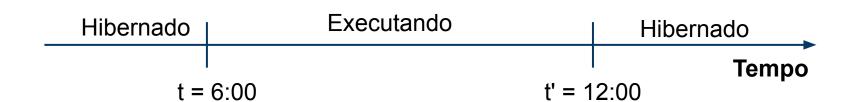
- Fatores envolvidos no cálculo do consumo de energia elétrica
 - Variação do tempo
 - Potência elétrica

Variação do tempo (t'-t)

 Total de tempo em que o sistema permaneceu em um dado estado

Exemplo:

 Um computador foi ativado no instante t e desativado no instante t'. Esse computador permaneceu t' - t unidades de tempo no estado ativo.



Potência Elétrica (P)

- Algumas definições:
 - Na Eletrodinâmica, potência elétrica é quantidade de energia elétrica transformada em outra modalidade de energia, por unidade de tempo
 - É a taxa em que o sistema consome energia
- A unidade mais comum é Watts (W)
- Exemplo:
 - Um processador Intel Pentium dual-core G6950 2.8 GHz opera em uma potência de 73 Watts quando está ativo

Energia Elétrica (E)

 Pode ser calculada como o produto entre o tempo de permanência no estado e a potência elétrica do estado

$$E = P * (t' - t)$$

 Uma unidade de energia muito utilizada é o quilowatt-hora (kWh). Um kWh é a quantidade de energia com potência de 1kW que é transformada no intervalo de 1h

Exemplo:

 Um computador que opera em uma potência de 250 kW durante 1 horas consome 250 kWh

Potência vs Energia

 Em um sistema computacional, reduzir a potência elétrica implica necessariamente em reduzir o consumo de energia elétrica?

$$E = P * (t' - t)$$

Potência vs Energia

 Em um sistema computacional, reduzir a potência elétrica implica necessariamente em reduzir o consumo de energia elétrica?

$$E = P * (t' - t)$$

Não necessariamente!

Potência vs Energia

- Reduzir a potência elétrica permite reduzir o consumo de energia quando não causa redução do desempenho do sistema (tempo de exposição)
- Exemplo: Considere um processador em que reduzir a frequência (GHz) permite reduzir também sua potência elétrica (watts)
 - Há economia de energia ao reduzir a frequência quando o processador está ocioso
 - Não há economia de energia ao reduzir a frequência quando o processador está em total utilização

Potência Elétrica e Desempenho

- Potência Elétrica (Watts) e Frequência (Hz)
- Tecnologia Semicondutor Metal-óxido Complementar (CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor)

$$P = C * V^2 * f$$

P = potência

C = Capacitância da tecnologia CMOS

V = voltagem

f = Frequência

Potência Elétrica e Desempenho

- Geralmente, admite-se perda de desempenho ao realizar a gerência de energia quando é necessário:
 - o reduzir o aquecimento
 - ex.: centro de dados (datacenters)
 - cumprir um orçamento de potência elétrica determinado por um sistema de tarifação
 - ex.: sistema de tarifação indústrial norte americano

Eficiência Energética

- Desenvolver sistemas que apresentem um consumo de energia proporcional à carga de trabalho
 - Consumir o mínimo possível de energia por computação realizada
 - Sistemas com maior Eficiência Energética

Eficiência Energética

- Eficiência Energética:
 - o "a otimização que podemos fazer no consumo de energia"
- Exemplo:
 - Um computador que consome 200 kWh (quilowatt-hora) pra executar um conjunto de tarefas é mais eficiente no aspecto energético que outro computador que, para executar esse mesmo conjunto de tarefas, consome 300 kWh

Métricas de Eficiência Energética

- Não existe uma métrica aceita por todos na comunidade
- Uma métrica adequada para medir a eficiência energética de um software pode não ser adequada para medir a eficiência energética de um hardware
- Exemplo de métricas
 - Performance por Watts
 - JouleSort





Ranking the World's Most ENERGY-EFFICIENT SUPERCOMPUTERS

HOME

ABOUT

GREEN LISTS

NEWS

RESOURCES

FAQ

CONTACT

- Eficiência Energética
 - Usa "Performance por Watt" como métrica de eficiência energética
 - GFLOPS unidade de desempenho
 - Watt unidade de potência elétrica

www.thegreengrid.or



Models and Metrics to Enable Energy-Efficiency Optimizations

Suzanne Rivoire, Stanford University
Mehul A. Shah and Parthasarathy Ranganathan, Hewlett-Packard Laboratories
Christos Kozyrakis, Stanford University
Justin Meza, University of California, Los Angeles

- Eficiência energética
 - Benchmark JouleSort
 - Usa "número de registros ordenados por joule" como métrica de eficiência energética

Especificações de Gerência de Energia em Computadores

Evolução

- 1989 Dispositivos
- 1992 BIOS
- 1998 Sistema Operacional
- 1999 Aplicação
- [?] Ambiente Distribuído

Gerência de Energia (Dispositivos)

- Iniciou em meados de 1982 quando os processadores Intel passaram a realizar algumas atividades de gerência de energia
 - o turndown de alguns componentes subutilizados

Gerência da Energia (BIOS)

 Em janeiro de 1992 foi proposta a primeira especificação de gerência avançada da energia (APM) para computadores

Advanced Power Management (APM)

BIOS Interface Specification

Z

Revision 1.2 February 1996

Intel Corporation
Microsoft Corporation

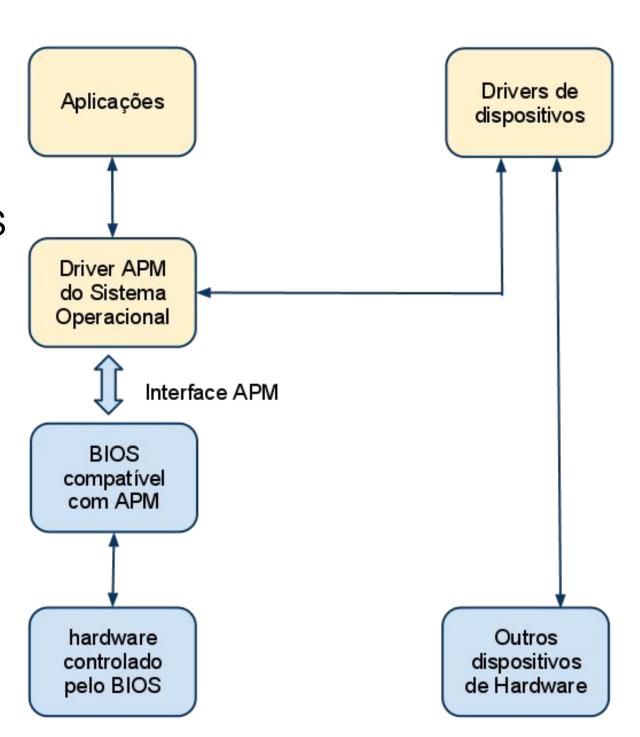
APM

 Primeira especificação desenvolvida com o objetivo de unificar a gerência de energia dos dispositivos

- Problemas:
 - Pouco detalhada
 - Configurações de gerência definidas na BIOS
 - Difícil de portar e/ou extender

Representação

 A gerência de energia é configurada na BIOS



Gerência da Energia (S.O.)

 Em dezembro de 1998 é proposta a especificação de configuração avançada e interface de energia para computadores

Advanced Configuration and Power Interface Specification

Hewlett-Packard Corporation Intel Corporation Microsoft Corporation Phoenix Technologies Ltd. Toshiba Corporation

Revision 4.0a April 5, 2010

http://www.acpi.info/spec.htm

ACPI

- É uma especificação aberta e voltada para o mercado
- Apresenta as diretrizes para o desenvolvimento de hardware e software compatíveis
 - É utilizada pelos dispositivos para definir a interface de gerência de energia
 - É utilizada pelos Sistemas Operacionais (S.O.) para realizar a gerência de energia dos dispositivos

Representação **Aplicações** SO Gerência da Kernel Energia Driver do Driver ACPI Dispositivo Interpretador AML **ACPI** Interface da Interface Interface do Tabela da BIOS registrador Tabelas ACPI Registradores ACPI **ACPI BIOS** Plataforma de Hardware BIOS Dispositivos da CPU Chipset placa mãe

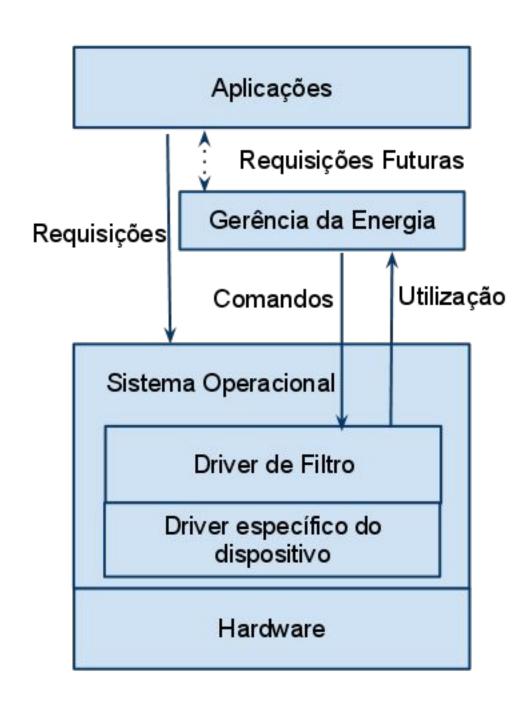
Gerência de Energia (aplicação)

- Lu et al. (1999) propõem que a gerência de energia pode ser realizada no nível da aplicação
 - o ex.: compiladores e interpretadores
- O programador pode desenvolver aplicações que "monitoram" o uso dos recursos e realizam a gerência de energia

Lu, Y.-H.; Simunic, T.; De Micheli, G. Software Controlled Power managment. (1999) Comput. Syst. Lab., Stanford Univ., CA

Representação

 Os comandos de gerência de energia são externos ao S.O.



Exemplo simples

• Implementação da gerência de energia em uma aplicação

```
ol. class JavaShutdown
02. {
03.
          private native void Shutdown();
                static
04.
05.
               System.loadLibrary("ShutdownImpl");
06.
07.
08.
          public static void main(String args[])
09.
10.
                new JavaShutdown().Shutdown();
11.
12. }
```

Estratégias Utilizadas na Gerência de Energia

Estados de consumo de energia

- Em sistemas que utilizam ACPI, a gerência de energia envolve o uso de três grupos de estados:
 - G-states (Global system power states)
 - P-states (Device and processor performance states)
 - Ajuste da frequência e/ou voltagem
 - S-states (System sleeping states)

G-States

G-States: Define quando o sistema está completamente "on", quando está em um estado de dormência ou de desligamento mecânico

| Modo | Definição |
|-------------------|--|
| G0 Working | Estado Operacional. |
| G1 Sleeping | Estado de dormência, inclui os s-states |
| G2/S5 Soft Off | Estado de dormência mais "agressivo" (hibernação), possui alta latência e baixa potência e não salva o contexto da memória |
| C3 Mechanical Off | Desligamento mecânico |

P-states

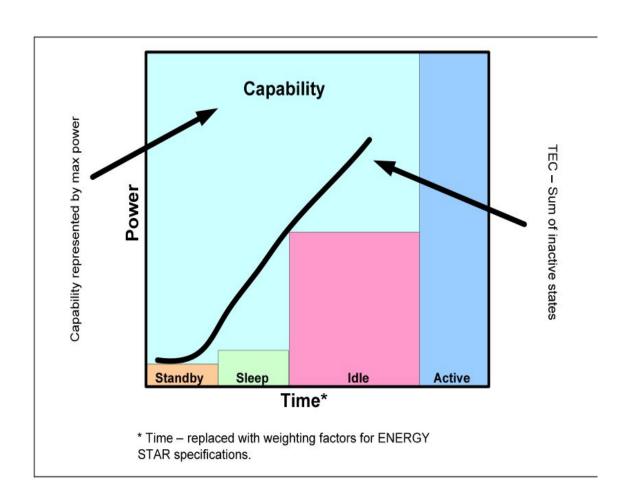
P-States: Define diversos estados de potência em que um processador pode operar



Ponciano, Lesandro; Brito, Andrey; Sampaio, Lívia; Brasileiro, Francisco. Energy-Efficient Computing through Productivity-Aware Frequency Scaling. In: 2012 International Conference on Cloud and Green Computing (CGC), 2012, Xiangtan. 2012. p. 191-198. DOI: 10.1109/CGC.2012.59

S-states

S-States: Define 5 estados de dormência (*sleep*) em que o sistema pode operar



Exemplo de estados de dormência

- Vamos focar em 2 estados de dormência
 - Sobreaviso (S3), salva o estado do sistema na memória RAM e desativa outros componentes como disco e processador
 - Hibernação (S4), salva o estado do sistema no disco e desativa outros componentes
- Ambos os estados interrompem as conexões TCP (Transmission Control Protocol) que se encontram ativas quando o computador é adormecido

Ponciano, Lesandro; Brasileiro, Francisco. On the impact of energy-saving strategies in opportunistic grids. In: Energy Efficient Grids, Clouds and Clusters Workshop (E2GC2 2010), 2010, Bruxelas. 11th ACM/IEEE International Conference on Grid Computing (Grid 2010), 2010. v. 1. p. 282-289. DOI: 10.1109/GRID.2010.5698003

Transições de Estado

- O sistema pode transitar um computador que se encontra no estado ativo para um estado de dormência
 - Objetivos
 - Economizar energia
 - Reduzir o aquecimento
 - Atender a um orçamento de energia
 - Problemas
 - Depreciação do recurso
 - Latência para retornar ao estado ativo quando surgir uma nova demanda

Depreciação dos Discos Rígidos

- Quando ativos, os discos rígidos operam em uma velocidade constante geralmente entre 3.600 e 12.000 rpm
- Transições de/para os estados Standby e Hibernação geram partidas/paradas dessas rotações



Depreciação dos recursos

- Os discos rígidos suportam uma quantidade limitada de transições ao longo do seu ciclo de vida
 - Geralmente esses discos rígidos dão suporte a 50.000 transições em 5 anos
 - Apenas 27 por dia :(

Depreciação dos recursos

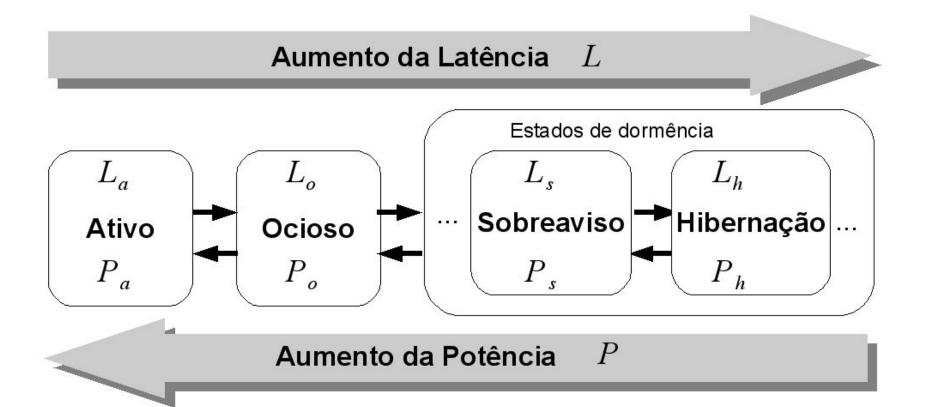
 Os Discos de Estado Sólido (SSDs) não apresentam esse problema por não possuírem partes móveis, mas apresentam outros tradeoffs



Latência de transição de estados

- Para que um computador seja transitado de/para um estado de dormência é necessário aguardar um tempo, esse tempo é conhecido como latência do estado
- Durante o tempo definido pela latência, o computador:
 - o opera na potência do estado ativo
 - o não é capaz de responder a qualquer estímulo do usuário
- Há um tradeoff entre a latência e a potência do estado
 - Quando menor a potência do estado, maior é sua latência

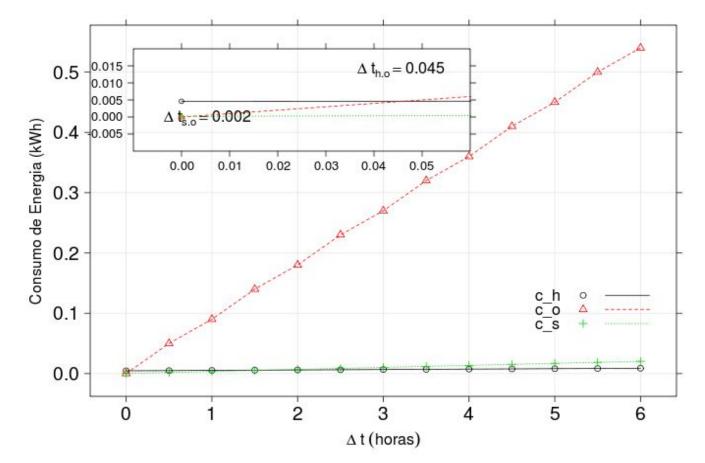
Tradeoff entre Potência e Latência



Tempo de equilíbrio (Break-even time)

 Tempo mínimo que o sistema deve permanecer em um estado de dormência para que a economia provida pelo estado pague o custo de transição (entrar e sair) de tal

estado



Tempo de Reativação

 Qual seria sua sensação se 'alguém' configurasse seu laptop para entrar em estado de hibernação após 2 segundos de ociosidade?

Tempo de Reativação

 Qual seria sua sensação se 'alguém' configurasse seu laptop para entrar em estado de hibernação após 2 segundos de ociosidade?



Tempo de Reativação

- O tempo de reativação pode:
 - o atrapalhar a experiência do usuário
 - demora a retornar ao estado ativo
 - geração de filas e aumento o tempo de resposta de tarefas
 - aumentar o consumo de energia, porque durante a transição o recurso opera em potência superior à potência do estado de dormência

Soluções Candidatas

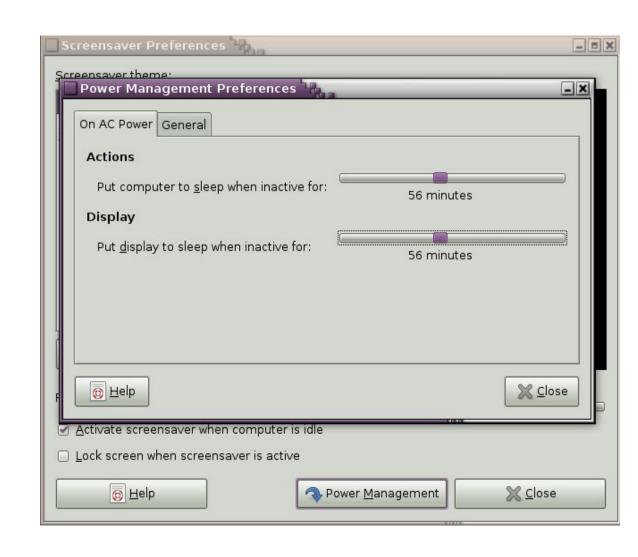
- Como resolver os problemas gerados pelas transições de estado?
 - Tempo de Inatividade
 - Predição de Demanda

Tempo de Inatividade

- Uma das formas de reduzir o impacto gerado pelo número excessivo de transições e pelo tempo de reativação
- Pode ser implementado como um Período de Temporização (timeout)
 - Define-se um temporizador que indica o tempo máximo em que um recurso deve permanecer inativo antes de ser colocado em um estado de dormência
 - Um estado de dormência é utilizado, se o temporizador expirar e o computador ainda estiver inativo

Período de Temporização

- Pressupõe que se um recurso permanecer inativo durante o período de temporização ele permanecerá inativo por um tempo ainda maior
- Geralmente é usado em computadores pessoais



Predição de Demanda

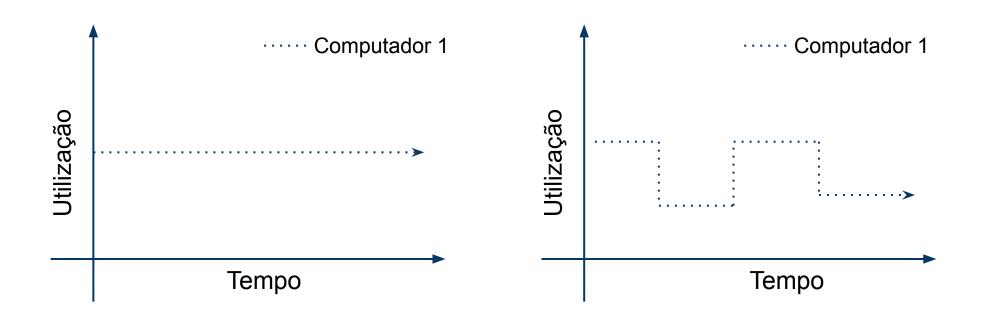
- Utiliza uma técnica de predição para identificar por quanto tempo o computador permanecerá inativo aguardando a chegada de uma nova tarefa. Dado esse tempo, decide se algum estado de baixo consumo de energia deve ser utilizado
- É usada na Gerência Dinâmica de Energia

Gerência Dinâmica de Energia

- A gerência da energia incluí
 - Estados de baixo consumo de energia
 - Temporização
 - Predição de demanda
- Gerência Estática
 - Utiliza uma configuração padrão
- Gerência dinâmica DPM (Dynamic Power Management)
 - As configurações são definidas dinamicamente de acordo com a carga de trabalho

Premissas da Gerência Dinâmica de Energia

 1º O sistema experimenta uma carga de trabalho não uniforme durante seu tempo de operação

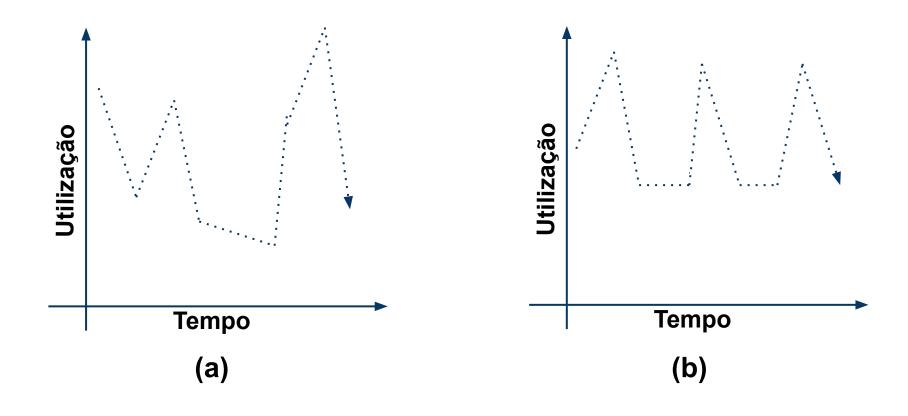


(a) Carga de trabalho uniforme

(b) Carga de trabalho não uniforme

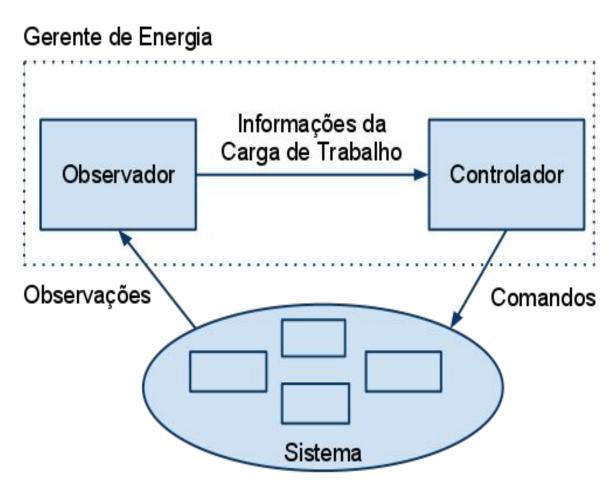
Premissas da Gerência Dinâmica de Energia

 2º É possível predizer com determinado grau de confiança as flutuações da carga de trabalho



Exemplo de Gerência Dinâmica de Energia

- Calcula o tempo estimado de chegada e o tamanho de uma nova demanda
- Utiliza o break-even time para definir se o recurso deve transitar de estado



Gerência de Energia em Redes de Computadores

Conceito

• Rede de computadores é:

"um conjunto de computadores autônomos interconectados por uma única tecnologia. Dois computadores estão interconectados quando podem trocar informações."

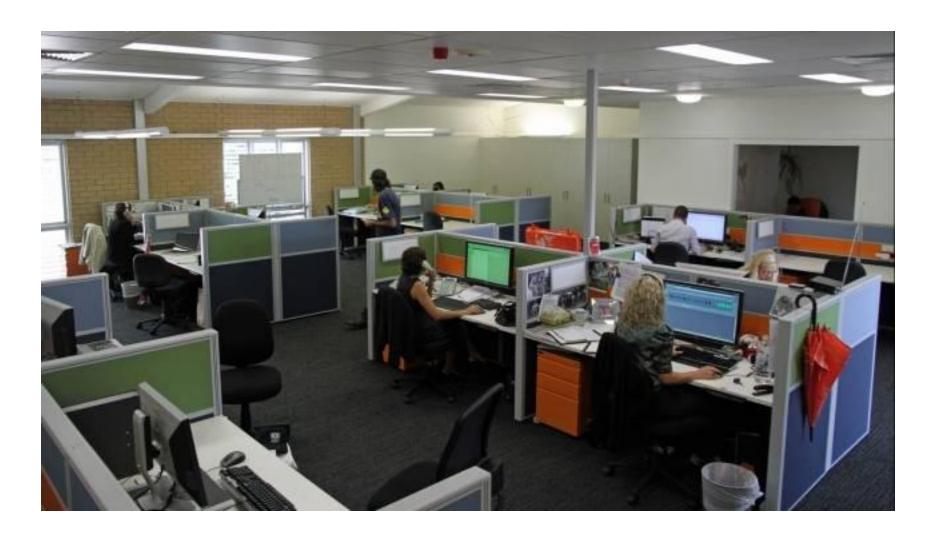
Tanenbaum

 Conjunto de computadores que podem trocar informações entre si

Redes Locais

- Em alguns casos a gerência de energia precisa ser feita por meio de uma rede de computadores
 - o ex.: Na rede local (LAN) de uma organização

Rede Local



• Conecta computadores em uma empresa, por exemplo

Manter a conectividade

 Manter a conectividade (ou presença de rede) é um dos fatores que difere a gerência de energia em um computador da realizada em uma rede de computadores

 Manter a conectividade significa que o computador precisa estar acessível para responder a uma requisição de rede, mesmo quando um estado de dormência é utilizado

Gerência de Energia em Redes Locais

- Conciliam o uso de estratégias de dormência para economizar energia e outro mecanismo para manter a conectividade
- Algumas tecnologias que têm sido propostas
 - WoL Proxy
 - Virtualização

WoL Proxy

- Cada computador informa ao WoL Proxy quando fica inativo.
 Após isso, entra em um estado de dormência
- Quando surge uma requisição remota a um computador que se encontra em um estado de dormência o WoL Proxy:
 - o intercepta a requisição
 - o acorda o computador adormecido
 - o encaminha a requisição
- Como o WoL Proxy acorda o computador adormecido?

Wake-on-LAN (WoL)

- "Pacote mágico" pacote UDP (*User Datagram Protocol*)
- A carga útil do pacote é composta por seis repetições do número 255 (em hexadecimal) seguido do endereço MAC do receptor repetido 16 vezes

```
DESTINATION SOURCE MISC FF FF FF FF FF FF FF 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 11 22 33 44 55 66 MISC CRC
```

Análise do WoL Proxy

- Pontos positivos
 - É simples de ser implementado
 - Não há alteração no ambiente utilizado pelo usuário local
- Ponto negativo
 - O WoL Proxy precisa conhecer o endereço MAC de todas as máquinas da sub-rede

WoL Proxy e Virtualização

- O ambiente de trabalho do usuário é mantido em uma máquina virtual
- A máquina virtual é migrada para um servidor remoto (ou outro computador na rede) após o usuário permanecer determinado tempo sem interagir com o computador
 - todo o ambiente de trabalho do usuário é mantido, ex.:
 estado da memória e conexões de rede
- Após a migração o computador pode ser adormecido

WoL Proxy e Virtualização

- No servidor a máquina virtual pode processar requisições que requerem pouco uso de recurso
- Quando o usuário interagir novamente com o computador:
 - o o computador é acordado
 - o a máquina virtual é migrada de volta
- A máquina virtual também pode ser migrada de volta ao computador de origem caso o uso de recursos supere o disponível no servidor

WoL Proxy e Virtualização

Pontos positivos

- as conexões de rede permanecem ativas quando o computador é adormecido
- pode-se alocar diversas máquinas virtuais em um mesmo servidor

Ponto negativo

 pode ser muito intrusivo para o usuário trabalhar em uma máquina virtual, pois alguns dispositivos apresentam problemas de operação quando utilizados nesse ambiente. Ex.: WebCAM, Placa de vídeo

Problema

Uma empresa possui 300 computadores de mesa. Geralmente, os usuários técnicos e especialistas acessam esses computadores remotamente. Em razão disso, os computadores permanecem sempre ligados para que a conectividade seja mantida. No último levantamento de custos, a empresa constatou que o consumo de energia desses computadores representa 60% do seu orçamento de TI e definiu que esse custo precisa ser reduzido para menos de 30%. Cabe ao departamento de TI propor uma solução.

Exemplo de Solução

- Que solução em software você desenvolveria/proporia para economizar energia e ainda manter a conectividade?
 - WoL Proxy com Virtualização
- Em que situações essa solução possibilitaria economia de energia?
 - Quando o tempo de ociosidade das máquinas for significativamente maior do que o break-even time
- Quais os custos associados à economia de energia?
 - Excesso de transições pode reduzir a vida útil dos HDs
 - Impacto na experiência dos usuários gerado pelo ambiente virtualizado e pelo tempo de reativação

Gerência de Energia em Sistemas Computacionais