



XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP
Artigo CREEM2012

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE TERMODINÂMICA DE SISTEMAS TÉRMICOS

Guilherme Hitoshi Kaneko e Márcio Higa

UEM, Universidade Estadual de Maringá, Curso de Engenharia Mecânica
Campus Maringá - Bairro Zona 7- CEP 87020-900 – Maringá – Paraná
E-mail para correspondência: guikaneko@gmail.com

Introdução

Há uma necessidade grande de resolução de problemas de sistemas térmicos em aplicações práticas, como usinas de álcool e açúcar (comuns na nossa região) envolvendo muitas vezes inúmeros equipamentos diferentes ligados na forma de ciclos. A resolução dos mesmos pode tornar-se demorada devido à necessidade de muitos dados e algumas vezes, devido ao tamanho dos cálculos, os resultados tornarem-se imprecisos ou com tendências a pequenos erros. Para isso a utilização de um programa específico para tais problemas possibilitaria uma resolução mais fácil e muito mais rápida, o que para a simples resolução de pequenos problemas pode não parecer significativo, mas em casos como a busca de melhoria de eficiência de certos ciclos, muito comuns na prática, em que o cálculo deve ser realizado várias vezes para a obtenção de um ciclo o mais eficiente possível, a economia de tempo mostra-se muito importante.

Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que viabilize a realização de análise termodinâmica envolvendo os equipamentos mais comuns em sistemas térmicos;

Após o desenvolvimento, a ferramenta deverá ser utilizada nas análises termodinâmicas de sistemas térmicos, tais como os existentes em plantas de usinas de açúcar e álcool ou outros tipos de indústrias e aplicações.

Metodologia

Segundo MORAN, M. e SHAPIRO, H. (2009), o projeto de sistemas térmicos envolve aplicações dos princípios de termodinâmica, da mecânica dos fluidos, além de campos como materiais, fabricação e projeto mecânico.

As análises envolvendo os tipos de sistemas considerados no programa usam, direta ou indiretamente, uma ou mais de três leis básicas da termodinâmica. Essas leis, que independem da substância ou do conjunto de substâncias em consideração, são: Princípio da conservação da massa; Princípio da conservação da energia; Segunda lei da termodinâmica.

Além dessas leis, normalmente é necessário que se utilizem relações entre as propriedades da substância ou das substâncias em questão. Os primeiros passos em uma análise termodinâmica são a definição do sistema e a identificação das interações relevantes com as vizinhanças. O foco então se volta para as leis físicas pertinentes e para as relações que permitam que o comportamento do sistema seja descrito em termos de um modelo de engenharia. Dentre as considerações tomadas para a modelagem dos problemas destaca-se:

- Ar como gás ideal;
- Utilizou-se apenas o sistema de unidades internacional (SI);
- Regime permanente, indica que nenhuma das propriedades do volume de controle se altera com o tempo;
- Escoamento unidirecional, o escoamento é normal à fronteira nas posições em que a massa entra ou sai do volume de controle. Todas as propriedades intensivas são uniformes em relação à posição ao longo de cada área de entrada ou saída pelo qual o fluido escoar;

Energia e a primeira lei da termodinâmica

Na termodinâmica, considera-se que a variação da energia total de um sistema é composta de três contribuições macroscópicas. Uma é a variação da energia cinética, associada ao movimento do sistema. Outra é a variação da energia potencial gravitacional, associada à posição do sistema como um todo no campo gravitacional terrestre. Todas as outras variações de energia são reunidas na energia interna do sistema, uma propriedade extensiva do sistema, como o é a energia total.

Os únicos caminhos para variar a energia de um sistema fechado são através da transferência de energia por meio de trabalho ou de calor.

Trabalho é um modo de transferir energia (representado por W) onde ocorrem interações entre um sistema e sua vizinhança. Um trabalho ‘positivo’ é realizado pelo sistema e um trabalho ‘negativo’ é realizado sobre o sistema. Uma das formas pelo qual um trabalho é realizado por, ou sobre, um sistema é: quando ocorre a variação de volume de certa quantidade de um líquido (ou gás) devido a uma expansão ou compressão. Potência é a taxa de transferência de energia por meio de trabalho (representado por \dot{W}). A mesma convenção de sinal é adotada.

Sistemas fechados podem interagir com suas vizinhanças de uma forma que não pode ser definida como trabalho, esse tipo de interação é chamado de transferência de energia através de calor. Uma transferência de calor ‘positiva’ é realizada para o sistema e uma transferência de calor negativa é realizada sobre o sistema. A taxa de transferência de calor líquida (representada por \dot{Q}) é a quantidade de energia transferida sob a forma de calor durante um período de tempo.

Segundo INCROPERA *et al.* (2008) a transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço.

Através dos balanços de energia, balanço de massa, definição de volume de controle e considerações de entalpia, a taxa temporal do balanço de energia pode ser descrito como:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (1)$$

Balanço de energia para um Ciclo

Os sistemas que percorrem ciclos fornecem uma transferência líquida sob a forma de trabalho para sua vizinhança durante cada ciclo. Qualquer desses ciclos é chamado de ciclo de potência.

$$W_{ciclo} = Q_{entra} - Q_{sai} \quad (2)$$

onde:

- Q_{entra} : representa a transferência de energia sob a forma de calor do corpo quente *para* o sistema

- Q_{sai} : representa a transferência de energia sob a forma de calor que *sai* do sistema para o corpo frio

O desempenho do sistema que percorre um ciclo de potência mede a extensão da conversão de energia de calor em trabalho, e é expressa pela eficiência térmica do ciclo:

$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{entra}} \quad (3)$$

Balanço de massa

O princípio da conservação da massa estabelece que: a variação da massa contida no interior do volume de controle é igual à diferença entre o fluxo de massa que entra e o fluxo de massa que sai do volume de controle.

Para escoamento unidimensional, pode-se considerar-se que:

$$\dot{m} = \rho AV \quad (4)$$

Sendo, $A[m^2]$ a área de secção transversal do tubo por onde o fluido escoar e $V[m/s]$ a velocidade de escoamento.

Para regime permanente tem-se que $dm_{vc}/dt=0$ e a equação do balanço de massa pode ser descrito como:

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (5)$$

Onde:

$-m_e$ vazão mássica instantânea na entrada

$-m_s$ vazão mássica instantânea na saída

Segunda Lei da Termodinâmica

Todo processo deve satisfazer ao princípio da conservação de energia, entretanto, nem todo processo consistente com o princípio da conservação da energia pode ocorrer. Um balanço de energia por si só não permite indicar o sentido preferencial (processos espontâneos) nem distinguir os processos que podem ocorrer daqueles que não podem. Assim como apenas com o balanço de energia não é possível determinar o estado final de equilíbrio de um sistema. Tais problemas necessitam de outro princípio geral, o qual é fornecido pela segunda lei.

Enunciado de Clausius

É impossível para qualquer sistema operar de tal maneira que o único resultado seja a transferência de energia sob a forma de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.

Enunciado de Kelvin-Planck

É impossível para qualquer sistema operar em um ciclo termodinâmico e fornecer uma quantidade líquida de trabalho para a sua vizinhança enquanto recebe energia por transferência de calor de um único reservatório térmico.

Enunciado da entropia

É impossível para qualquer sistema operar de uma forma que a entropia seja destruída.

Irreversibilidades

Um dos usos mais importantes da segunda lei da termodinâmica em engenharia é a determinação do melhor desempenho teórico dos sistemas. Distingue-se os processos reais dos ideais pois os processos reais desenvolvem irreversibilidades.

Um processo é chamado irreversível se o sistema e todas as partes que compõem sua vizinhança não puderem ser restabelecidos exatamente aos seus respectivos estados iniciais após o processo ter ocorrido. Um processo é reversível se tanto o sistema quanto sua vizinhança puderem retornar aos seus estados iniciais. Um sistema não está entretanto impedido de voltar ao seu estado original, mas uma vez novamente no estado original, não seria possível retornar a vizinhança ao estado inicial.

Os processos que envolvem eventos espontâneos são irreversíveis, como: transferência de calor espontânea, expansão não resistida de um gás ou líquido, atrito, resistência elétrica, histerese e deformação inelástica. Todos os processos reais são irreversíveis.

Embora um processo reversível não possa ocorrer, certos processos que realmente ocorrem são aproximadamente reversíveis

Propriedades

Definindo estado

Para os ciclos térmicos envolvendo água como fluido de trabalho, há dois estados utilizáveis: líquido e vapor. Os quais foram subdivididos em: líquido comprimido, líquido saturado, vapor saturado, vapor superaquecido e mistura bifásica líquido-vapor. Já para os ciclos a ar utiliza-se sempre o mesmo estado: gás.

Para a mistura bifásica líquido-vapor, utiliza-se a razão entre a massa de vapor presente na mistura e a massa total da mistura, chamada título (x), o qual varia de 0 a 1, sendo que um título igual a 0 indica que há apenas líquido saturado, e um título igual a 1 indica apenas vapor saturado.

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{liquido} + m_{vapor}} \quad (6)$$

Estado de um sistema fechado em equilíbrio é sua condição como descrita por valores de suas propriedades termodinâmicas, sabe-se que nem todas as propriedades são independentes entre si, e que o estado físico pode ser unicamente determinado pelo estabelecimento dos valores das propriedades independentes. Sistemas de substâncias puras, tais como água e misturas de gases não reativos (considerados gases ideais) são denominados sistemas compressíveis simples. O número de propriedades independentes para se determinar o estado, assim como algumas propriedades, de tais substâncias é dois.

Tabelas

Para a obtenção das propriedades termodinâmicas, foram inseridas diversas tabelas de propriedades, obtidas através do site <http://www.ohio.edu/mechanical/thermo/>. Como os estados envolvidos na resolução de problemas normalmente não estão contidos no conjunto de valores fornecidos pelas tabelas, foi utilizado o

método de interpolação linear, como uma aproximação com precisão aceitável, para a obtenção das propriedades entre os valores já existentes na tabela.

Para a água foi inserido as seguintes tabelas: Água saturada (líquido-vapor); Vapor d'água superaquecido e água líquida comprimida. Contendo pressão (p [kPa]), temperatura(T [°C]), entalpia(h [kJ/kg]), entropia (s [kJ/kg.K]) e massa específica(ρ [kg/m³]).

Para o ar foi inserida a tabela de ar como gás ideal, contendo temperatura (T [K]), entalpia (h [kJ/kg]) e entropia (s° [kJ/kg.K]).

Sistemas de Potência a Vapor

Os componentes básicos de uma usina simplificada de potência a vapor podem ser esquematizados como a figura 3.1, onde se tem em A uma caldeira, em B uma turbina, em C um condensador e em D uma bomba. Outros ciclos mais complexos podem envolver outros equipamentos, tais como, regeneradores abertos e/ou fechados, purgadores, bocais, entre outros componentes.

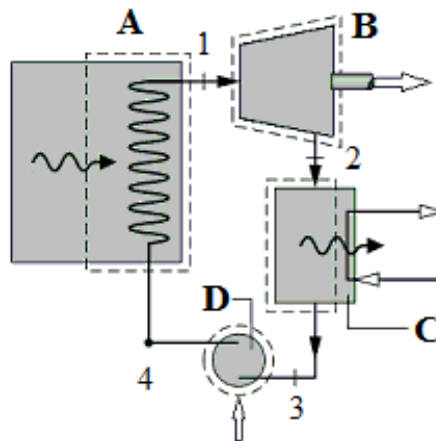


Figura 1 - Representação de um ciclo de Rankine simples. Fonte Moran e Shapiro (2009)

Linguagem de programação

Escolheu-se a linguagem Delphi para o desenvolvimento do programa, dentre outras coisas devido a sua semelhança com a linguagem Pascal, a qual foi brevemente estudada em uma das matérias lecionadas durante o curso. Com um diferencial muito importante em relação ao Pascal, a interface gráfica, que apesar de cumprir o mesmo objetivo da interface textual (utilizada em Pascal) é constituída por vários componentes visuais os quais facilitam a utilização do software por parte do usuário.

Segundo Boratti, I. C. (2007) a interface é a forma de comunicação com o mundo exterior ao próprio programa, constitui-se na “cara” com que o programa se apresenta ao usuário.

Resultados

Após diversas alterações, o programa foi concluído de forma a resolver ciclos termodinâmicos de vapor (Ciclo de Rankine), podendo o mesmo ser aplicado desde os ciclos ideais aos ciclos de melhoria de desempenho, podendo contar com até 10 equipamentos correlacionados entre si formando o ciclo.

Utilizando o programa

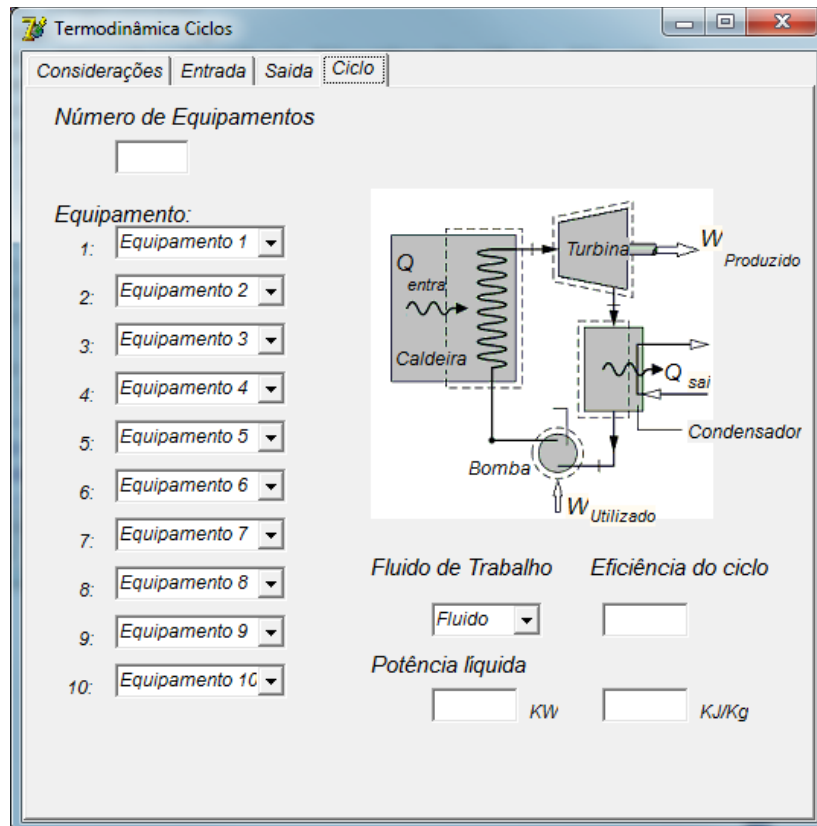
Ao executar o programa, tem-se a tela inicial do mesmo, onde há uma representação do ciclo básico de Rankine. Deve-se escolher o fluido de trabalho (água ou ar) e os equipamentos contidos no ciclo desejado.

O programa possui a possibilidade de escolha entre oito equipamentos diferentes, sendo eles: Turbina, bomba, compressor, caldeira, condensador, regeneradores aberto ou fechado e purgador.

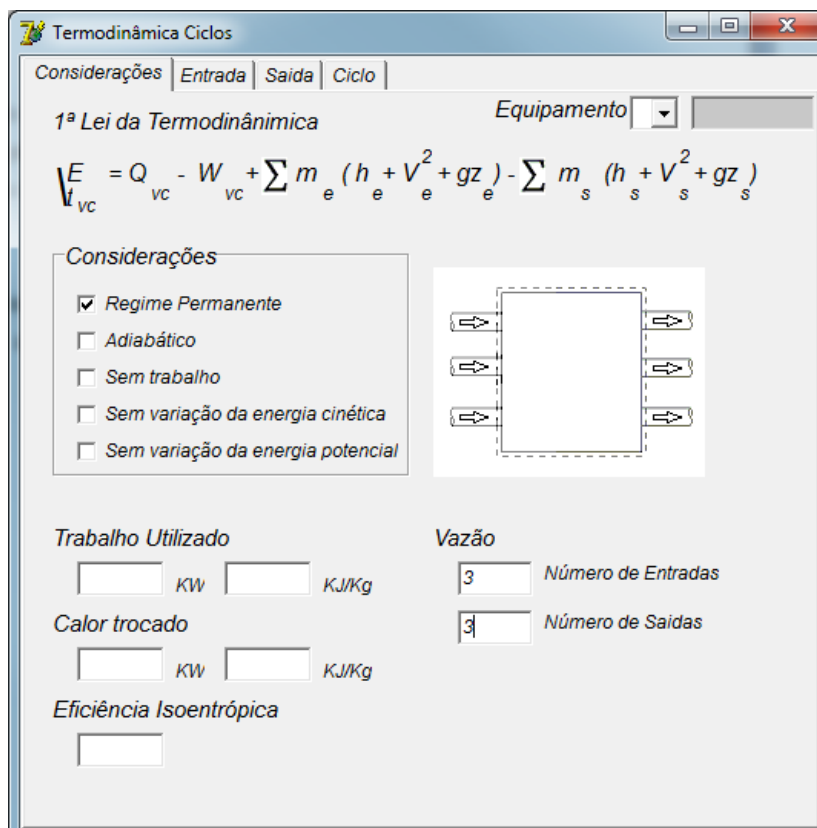
Escolhidos os equipamentos, deve-se inserir dados para os equipamentos para a realização do cálculo, os passos a seguir devem ser repetidos, até que todos os equipamentos estejam com dados suficientes para a realização do cálculo.

Selecionando-se a aba “Considerações”, ilustrada pela Fig. 2(b), deve-se selecionar o número do equipamento que se deseja inserir dados na caixa de seleção, ao lado de “Equipamento” no canto superior direito. Em seguida, se possuir, selecionar as considerações desejadas para o equipamento, o número de entradas e de saída, sendo que o programa permite de 1 a 3 entradas e saídas, e a eficiência isoentrópica.

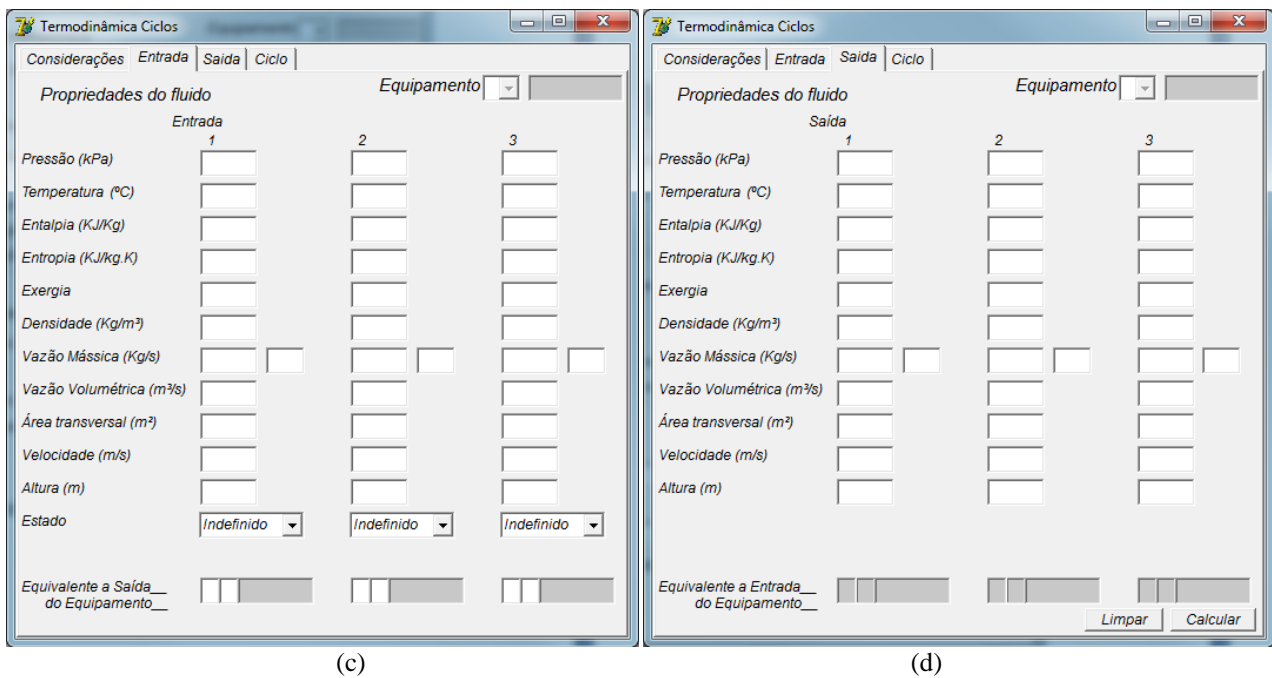
Em seguida, seleciona-se a aba “Entrada”, ilustrada pela Fig. 2(c), deve-se entrar com dados de entrada para cada entrada do equipamento selecionado sua relação de entrada e saída entre os equipamentos do ciclo. É importante salientar, que o número de dados inseridos deve tornar a obtenção de dados possível, da mesma forma que seria feito caso fosse necessário obter dados em tabelas.



(a)



(b)



(c) (d)
 Figura 2 – (a) Tela inicial do programa; (b) Considerações; (c) Entrada (d) Saída

Fazendo-se a relação corretamente entre as saídas e entradas dos equipamentos, os dados calculados são automaticamente copiados para o equipamento correlato, sendo assim, necessária a inserção de cada ponto do ciclo apenas uma vez, a correlação de forma correta é também importante para o correto cálculo do ciclo. Por exemplo, na Fig. 2(d) tem-se a ilustração de um ciclo básico, o ponto “1” é tanto a saída 1 da caldeira, como a entrada 1 da turbina, mas inserindo-se apenas o dado na entrada da turbina e fazendo-se a relação o programa automaticamente copia os dados como sendo da saída 1 da caldeira, e vice-versa.

Após a inserção dos dados de entrada, inserem-se os dados de saída do equipamento, utilizando a aba “Saída” ilustrada pela figura 4.4, sendo feito de forma análoga a inserção dos dados de entrada, entretanto, sem as relações entre os equipamentos.

Realiza-se como dito anteriormente a repetição das etapas até que os dados de todos os equipamentos estejam inseridos. Após a inserção de todos os dados, clica-se no botão “calcular”. A partir dos dados o programa busca as propriedades em tabelas, e calcula utilizando as leis da termodinâmica juntamente com as considerações os dados do ciclo como potência e eficiência, calculando também de cada equipamento separadamente. Selecionando-se em “considerações” o equipamento ao qual se deseja ver os dados.

Conclusões

Utilizando-se o Delphi como linguagem para o desenvolvimento do programa, e fazendo-se as análises principalmente de termodinâmica. No geral, conseguiu-se realizar um programa satisfatório, capaz de realizar diversos problemas térmicos, envolvendo os principais equipamentos encontrados nos problemas de determinados sistemas térmicos, de forma relativamente simples, e rápida.

Uma possibilidade viável seria a continuação do projeto para dar continuidade e possibilitar a análise de outros sistemas mais específicos, aumentando-se a biblioteca de propriedades podendo abranger uma maior diversidade de problemas, como por exemplo, ciclos de refrigeração, dados de propriedades tabeladas dos fluidos refrigerantes deveriam ser inseridos na biblioteca do programa, mas a resolução dos problemas seria realizada com apenas pequenas alterações, pois os ciclos são realizados de forma muito semelhante.

Referências Bibliográficas

- Boratti, I. C. Programação Orientada a Objetos usando Delphi. 4. Ed. Florianópolis: Visual Books, 2007.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008
- Moran, M., Shapiro, H. Princípios de Termodinâmica para engenharia. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- URIELI, I. Engineering thermodynamics – A Graphical Approach. Ohio University Ohio, 2010. Disponível em: <<http://www.ohio.edu/mechanical/thermo/>>. Acesso em 30 de Outubro de 2011.