

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação

Simulador de turbina a gás adaptado para execução na nuvem

Igor Soares Campos

Orientador: **Dr. Marcelo Dreux**

Co-Orientador: **Dr. Sandro Barros Ferreira**

Rio de Janeiro
3 de dezembro de 2015

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO**

Departamento de Engenharia Mecânica

Simulador de turbina a gás adaptado para execução na nuvem

Igor Soares Campos

Relatório de Projeto Final de Graduação
apresentado à banca de Engenharia Mecânica
da Pontifícia Universidade Católica do Rio de
Janeiro - PUC-RIO como requisito parcial para
obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: **Prof. Dr. Marcelo de Andrade Dreux**
Co-Orientador: **Dr. Sandro Barros Ferreira**

Agradecimentos

Dedico o presente trabalho a aqueles que sempre me apoiaram e incentivaram na minha jornada acadêmica. Nesta fase final da graduação, percebo o quanto foi importante estar cercado das pessoas certas.

Gostaria de agradecer a meus pais, que sempre me incentivaram em todas as minhas batalhas e escolhas. Eles se mostraram um exemplo a seguir no meu percurso até aqui. Foram minha inspiração, para que nunca desistisse dos meus sonhos e sempre acreditasse em mim.

Agradeço aos meus amigos, que me mostraram o significado de companheirismo e amizade. Tanto na hora do estudo e nos trabalhos em grupo, quanto nos momentos de diversão e relaxamento, depois de fases estressantes. Partilhamos dúvidas, incertezas e conhecimento nesta caminhada.

Apresento aqui meu reconhecimento aos meus orientadores, Marcello Dreux e Sandro Barros, a experiência na GT2 me ajudou a crescer profissionalmente e potencializou o interesse que já tinha na área de programação para mecânica. Incluo a equipe da GT2 Energia neste agradecimento, em especial o Gustavo Pinto, por toda ajuda técnica e a disponibilização das ferramentas que viabilizaram a conclusão desse projeto.

Por fim, meu muito obrigado a todos que direta ou indiretamente estiveram comigo durante estes anos tão importantes da minha vida. Certamente a fase de realização de um grande sonho, a minha formatura como engenheiro mecânico.

Resumo

Esse projeto visa desenvolver um simulador para a web que seja capaz de executar diversos modelos matemáticos, com o foco na simulação de um modelo de turbina a gás. Para isso, esse documento faz uma revisão sobre a física envolvida no funcionamento de uma turbina a gás, e sobre a tecnologia de aplicações para web.

Palavras-Chave

Simulação, Simulador de turbinas, Simulador para Web, Programação, Modelo de turbina a gás

Abstract

This project intend to design a web simulator capable to execute different kinds of mathematical models. But, the main objective is the simulation of a gas turbine model. For that purpose, this document will review the theory behind a gas turbine for energy and web applications.

Sumário

1	Introdução	8
1.1	Justificativa	8
2	Objetivo	8
3	Revisão Bibliográfica	8
3.1	Turbinas	8
3.1.1	Introdução a turbina a gás	8
3.1.2	Teoria	9
3.1.2.1	Ciclo ideal	9
3.1.2.2	Ciclo real	13
3.2	Computação em nuvem	15
3.2.1	Tecnologia	15
3.2.2	Design Pattern	17
4	Projeto	18
4.1	Modelagem de uma turbina a gás	18
4.2	Metodologia de programação de simuladores	22
4.3	Configurações e Instalação da aplicação	27
5	Resultados	28
5.1	Funcionalidades	28
5.1.1	Simulação da turbina a gás	28
5.1.2	Melhorias futuras	32

Lista de Figuras

1	Forma simples de uma turbina a gás	9
2	Ciclo Brayton	11
3	Trabalho Especifico x Razão de pressão	12
4	Eficiência x Razão de pressão	12
5	Relação TxS na compressão representando as temperaturas estáticas e de estagnação	14
6	Curvas características de compressores	15
7	Representação do acesso a aplicação pelo protocolo HTTP	16
8	Diagrama de relacionamento do padrão MVC	17
9	Fluxograma do modelo matemático	22
10	Diagrama da classe Tag	23
11	Fuxo secundário dos modelos matemáticos	25
12	Padrão MVC com suas respectivas classes principais	27
13	Temperatura do ar na entrada do compressor em função do horário de simulação	28
14	Temperatura na saída do compressor e entrada da câmara de combustão em função do horário de simulação	29
15	Razão de pressão do compressor em função do horário de simulação	29
16	Temperatura de saída da turbina em função do horário de simulação	30
17	Potência gerada útil	30
18	Rotações por minuto da unidade de turbina a gás	31
19	Indicação do status do turning gear	31
20	Indicação do status do turning gear	32
21	Flag indicador do regime de operação	32

Lista de Tabelas

1	Tabela de valores de n	10
2	Tabela de descrição das propriedades da memoria compartilhada	24
3	Tabela de descrição dos métodos da classe ComumMethod	26

Lista de símbolos

$\eta = \textit{Rendimento}$

C_{p0} = Calor específico a pressão constante e pressão zero

h = Entalpia específica

T = Temperatura

S = Entropia total

H = Entalpia total

V = Volume

P = Pressão

s = Entropia específica

R = Constante ideal dos gases

k = Razão entre os calores específicos a pressão

W = Trabalho

Q = Calor transferido total

$\gamma = \textit{Gamma}$

1 Introdução

1.1 Justificativa

Com a atual crise hídrica no Brasil, o uso de termoeletricas é cada vez mais recorrente. As turbinas utilizadas para geração de energia elétrica são equipamentos extremamente caros e que necessitam de experiência e treinamento prévio para operação, aumentando a demanda por treinamento de mão de obra para operar essas máquinas. A internet e as aplicações para web vêm reduzindo o custo desses treinamentos, e consequentemente facilitando cada vez mais o acesso à informação.

2 Objetivo

Esse projeto tem como objetivo adaptar um modelo de turbina a gás para uma aplicação para web. O usuário será capaz de simular a partida, parada e o regime permanente da turbina, podendo plotar gráficos de diversos parâmetros durante todo o processo.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Turbinas

3.1.1 Introdução a turbina a gás

A turbina a gás surgiu um pouco antes da segunda guerra mundial, com o objetivo de gerar trabalho de eixo. Mais compacta que uma turbina a vapor, com um menor atrito interno e uma maior relação potência/peso que um motor pistonado, a turbina a gás ganhou espaço junto com o aumento de sua eficiência. Atualmente é amplamente utilizada no mercado para converter energia em trabalho, para geração de eletricidade ou propulsão na indústria, Aeronáutica e Marinha.

Saravanamuttoo, H.; Rogers G. & Cohen H.[4, p.1] afirmam que diferente de motores pistonados, que têm todos os principais processos ocorrendo no mesmo equipamento, a unidade de turbina a gás possui três equipamentos essenciais: o compressor, a câmara de explosão e a turbina. Essa configuração viabiliza uma otimização individual de cada um dos processos, que ocorrem separadamente em cada equipamento. Para que haja uma expansão na turbina, e assim gere um trabalho de eixo, é preciso fornecer uma razão de compressão através do compressor, já que a combustão é isobárica. Como tanto o compressor quanto a turbina não são 100% eficientes, o sistema só funciona com a adição de energia ao fluido de trabalho com a queima de combustível na câmara de combustão. A unidade de turbina a gás necessita de uma quantidade mínima de combustível para se manter em funcionamento, vencendo apenas a ineficiência dos seus componentes, sem gerar trabalho útil, a princípio. A combustão pode ser feita por dois processos diferentes: a queima a pressão constante e a queima a volume constante. Apesar da última opção, na teoria, ser a mais eficiente, é preciso um sistema mais complexo, onde válvulas de controle são necessárias. Desta forma, a queima passaria a ser intermitente, o que prejudica

o funcionamento suave do sistema. Consequentemente, a combustão a pressão constante ficou sendo o método usual.

Apesar desse trabalho ser focado na configuração mais simples da turbina a gás, há formas de melhorar a sua eficiência, como por exemplo, utilizando mais de um compressor intercalado com intercooler. Outra opção seria usar mais de uma turbina com reaquecedores entre elas. Os principais fatores que limitam o desempenho de uma turbina são: a eficiência de seus componentes, a razão de pressão de seu compressor e a temperatura máxima de admissão da turbina. Este último, é limitado pelo material e a tecnologia utilizada para construção das palhetas da turbina.

3.1.2 Teoria

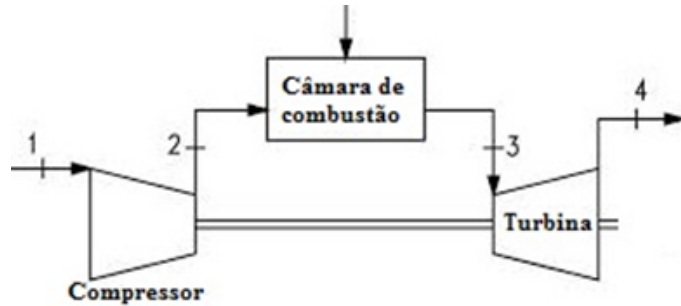


Figura 1: Forma simples de uma turbina a gás

3.1.2.1 Ciclo ideal De acordo com Borgnakke, C. & Sonntag, E.R.[5, p.176]:

Um dispositivo pode ser denominado de motor térmico, quando opera de acordo com um ciclo termodinâmico, realizando trabalho positivo à custa da transferência de calor de um corpo a temperatura elevada e para um corpo a temperatura inferior. A definição de motor térmico é muitas vezes estendida para todos dispositivos que geram trabalho através da troca de calor ou combustão. Como é o caso da turbina a gás. Para entender melhor os processos e formulações da física de uma turbina a gás, deve-se relembra algumas relações termodinâmicas importantes dos gases ideais.

$$C_{p0} = \frac{dh}{dT} \quad (1)$$

$$TdS = dH - VdP \quad (2)$$

Ao manipular essas equações sabendo que o processo de interesse é isentrópico, tem-se:

$$s_2 - s_1 = 0 = C_{p0} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (3)$$

e

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(RC_{p0})} \quad (4)$$

Onde,

$$RC_{p0} = (C_{p0} - C_{v0})/C_{p0} = (k - 1)/k \quad (5)$$

Sabendo que k é a razão entre os calores específicos a pressão e volume zero. Os processos reversíveis de gases ideais geralmente ocorrem de modo que a curva $\log P$ x $\log V$ é uma linha reta, consequentemente respeitando a relação:

$$P * V^n = constante = P_1 * V_1^n = P_2 * V_2^n \quad (6)$$

Esses processos são chamados de politrópicos e podemos a partir da expressão acima e as relações termodinâmicas já mencionadas deduzir as relações:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1^n}{V_2^n} \quad (7)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \quad (8)$$

Onde,

Processo isobárico	$n=0$	$P = constante$
Processo isotérmico	$n=1$	$T = constante$
Processo isentrópico	$n=k$	$s = constante$
Processo isocórico	$n=infinito$	$v = constante$

Tabela 1: Tabela de valores de n

Segundo Saravanamuttoo, H.; Rogers G., Cohen H. & Straznicky P.[4, p.46]:

Para analisarmos a performance de uma turbina a gás, é útil avaliarmos o ciclo ideal que representa seu funcionamento, conhecido como Ciclo Brayton. Esse é composto por quatro processos, dois isobáricos e dois isentrópicos. Esse ciclo parte das seguintes hipóteses:

- Os processos de expansão e compressão são reversíveis e adiabáticos;
- A variação de energia cinética do fluido de trabalho é desprezível, assim como as perdas de carga;
- O fluido de trabalho tem a mesma composição e vazão mássica durante todo ciclo.

A principal vantagem de analisarmos o ciclo padrão a ar, apesar de ser diferente do ciclo real, é avaliar qualitativamente a influência de cada variável no desempenho do ciclo. A eficiência do ciclo ideal depende somente da razão de pressão do compressor, e do tipo de fluido de trabalho da turbina, como podemos ver pela equação 9.

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (9)$$

$$\eta_{termico} = \left(1 - \frac{C_p * (T_4 - T_1)}{C_p * (T_3 - T_2)} \right) \quad (10)$$

É possível observar nos diagramas da figura 2: as relações da temperatura com a entropia e da pressão com o volume específico do fluido de trabalho durante todo o ciclo. Onde no estágio 1-2 ocorre a compressão, 2-3 a combustão e 3-4 a expansão. É notório que ao passar do ciclo 1-2-3-4 para o 1-2'-3'-4' com o aumento na razão de pressão do compressor, vemos um aumento significativo no calor fornecido ao sistema, enquanto o calor rejeitado continua o mesmo. Além de que o ponto 3' está acima da temperatura máxima permitida, limitando o ciclo para o 1-2'-3''-4'. Demonstrando novamente o aumento da eficiência do ciclo devido ao aumento da razão de pressão.

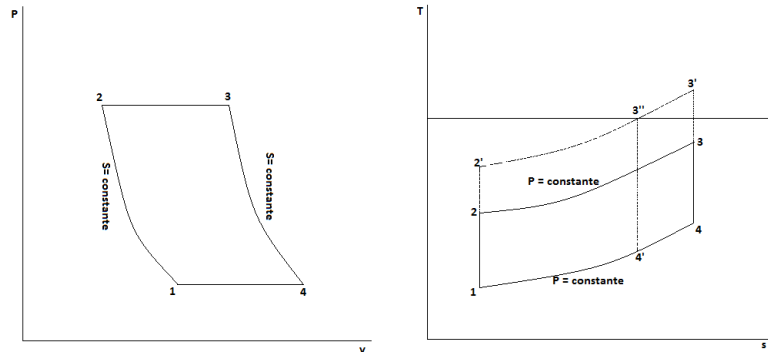


Figura 2: Ciclo Brayton

Ao aplicarmos a equação de balanço de energia, para regime permanente em cada componente principal da turbina teremos:

$$W_{12} = -(h_2 - h_1) = -c_p(T_2 - T_1) \quad (11)$$

$$Q_{23} = -(h_3 - h_2) = -c_p(T_3 - T_2) \quad (12)$$

$$W_{34} = -(h_4 - h_3) = -c_p(T_4 - T_3) \quad (13)$$

O trabalho útil da turbina é também função da máxima temperatura do ciclo T_3 . Que seria o trabalho gerado pela turbina W_{34} , menos o trabalho consumido pelo compressor W_{12} . Porém, a temperatura em 3 deve sempre ser controlada para não passar o limite do material das palhetas da turbina, que podem sofrer fluência, prejudicando a vida útil de projeto do equipamento. Essa característica é um grande limitador da performance do sistema, apesar de vir melhorando com o avanço das tecnologias metalúrgicas. No começo da história da turbina a gás, sua razão de pressão ficava entre 3 e 4, enquanto hoje em dia já temos turbinas funcionando com uma razão de temperatura entre 5 e 6. Na figura 3 temos quatro curvas da potência útil normalizada, equação [14], em função da razão de pressão do compressor para diferentes razões $t = \frac{T_3}{T_1}$. Enquanto no gráfico da figura 4 temos duas curvas que relacionam a eficiência com a razão de pressão do compressor, para o ar ($\gamma = 1,4$) e para o argônio ($\gamma = 1,66$).

$$\frac{W}{c_p T_1} = t \left(1 - \frac{1}{r^{(\gamma-1)/\gamma}} \right) - (r^{(\gamma-1)/\gamma} - 1) \quad (14)$$

Para encontrar a razão de pressão, que com um determinado "t", gera uma potência máxima pelo sistema, devemos igualar a derivada da equação[14] a zero. E o resultado será:

$$r_{ideal}^{(\gamma-1)/\gamma} = \sqrt{t} \quad (15)$$

Substituindo esse resultado na equação[8], e após certo algebrismo, pode-se concluir que quando $T_2 = T_4$, ou seja, a temperatura de saída do compressor e da turbina sejam os mesmos, o trabalho específico será máximo. Assim como quando a razão de pressão for igual a 1 ou $t^{\gamma/(\gamma-1)}$ não haverá trabalho sendo gerado. É possível concluir que quando o valor de r está entre 1 e o r_{ideal} , $t^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}}$, teremos $T_4 > T_2$. Portanto havendo um gradiente de temperatura entre os gases de saída da turbina e do compressor, um trocador de calor pode ser utilizado para pré-aquecer o gás que vai para a câmara de combustão, diminuindo a adição de energia externa pela câmara de combustão, aumentando assim a eficiência do ciclo.

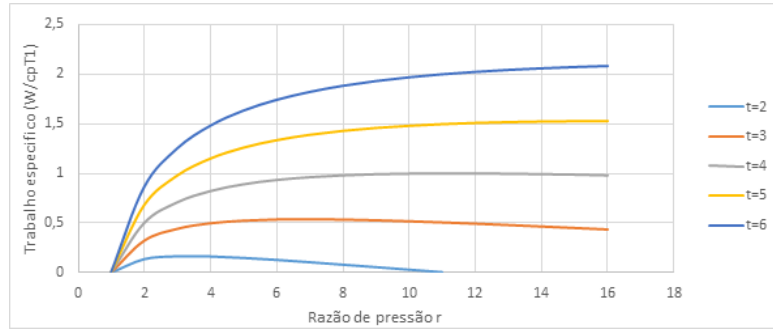


Figura 3: Trabalho Específico x Razão de pressão
1

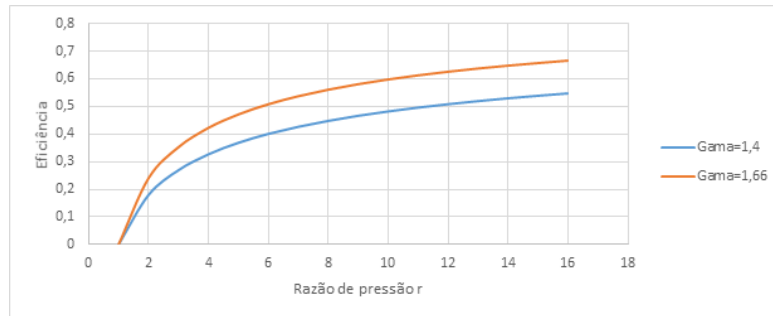


Figura 4: Eficiência x Razão de pressão
2

3.1.2.2 Ciclo real Saravanamuttoo, H.; Rogers G., Cohen H. & Straznicky P.[4, p.54] garantem que:

A eficiência dos componentes de uma turbina é obtida pela razão do ciclo real com o ciclo ideal. Foi considerado, na seção anterior, que a compressão e expansão da turbina são processos isentrópicos, o que não é verdade. No ciclo ideal, ao se ignorar a energia cinética de um gás durante a compressão ou expansão adiabática, estava-se negligenciando a sua influência na reversibilidade do processo, o que acarreta um aumento da entropia do fluido. Pode-se representar também os valores da temperatura e pressão de estagnação do fluido no diagrama $T * S$. A diferença da entalpia estática para a de estagnação pode ser calculada pela equação 15, onde h é a entalpia estática, h_0 é a entalpia de estagnação e C é a velocidade do fluxo. Essa diferença deve-se a conversão da energia cinética do fluido quando o desaceleramos a zero.

$$h_0 - h = C^2/2 \quad (16)$$

Sendo que a entalpia, pode ser substituída por $c_p * T$ quando o fluido é um gás ideal, como está representado na equação 16, representando a diferença entre a temperatura estática e a temperatura de estagnação.

$$T_0 - T = \frac{C^2}{2 * C_p} \quad (17)$$

Analogamente, utilizando a equação 8, é possível definir também a pressão de estagnação pela equação:

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (18)$$

Observe na figura 5, que o ponto 1, entrada do compressor no ciclo ideal, passa para o ponto 01, com um acréscimo de $\frac{C_1^2}{2 * C_p}$ na temperatura, devido a contabilização de sua velocidade de entrada no compressor. Após uma compressão isentrópica o ar passa para o estado 02', porém a variação na energia cinética do fluido torna o processo irreversível, aumentando a entropia do gás. Representa-se, portanto, o ponto 2, como o aumento da temperatura estática devido a compressão irreversível, e o ponto 02 após o aumento isentrópico de temperatura e pressão do ponto 2.

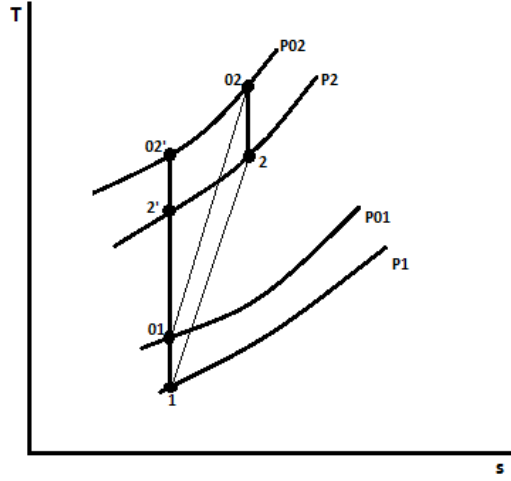


Figura 5: Relação TxS na compressão representando as temperaturas estáticas e de estagnação

3

Com a definição de eficiência isentrópica é possível identificar também a relação entre a temperatura, pressão, γ e a eficiência isentrópica, que posteriormente veremos a utilidade. A partir dos conceitos definidos nas ultimas seções, é possível determinar que a eficiência do compressor e da turbina são razões do ciclo real e do ciclo ideal (isentrópico). Sendo chamada portanto de eficiência isentrópica. Calculada pela equação 17 para o compressor e 18 para a turbina.

$$\eta_c = \frac{T'_{02} - T_{01}}{T_{02} - T_{01}} \quad (19)$$

$$\eta_t = \frac{T_{03} - T_{04}}{T_{03} - T'_{04}} \quad (20)$$

Manipulando a equação da eficiência isentrópica do compressor e fazendo alguns substituições apresentadas nessa revisão, chega-se a relação a seguir:

$$T_{02} - T_{01} = \frac{T_{01}}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} - 1 \right] \quad (21)$$

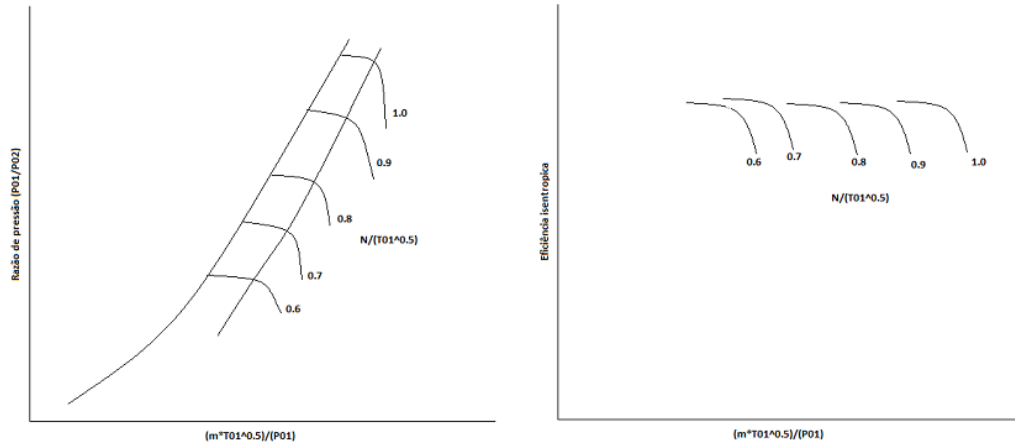


Figura 6: Curvas características de compressores

4

A perda de pressão por atrito nos componentes da unidade de turbina a gás diminui a sua razão de pressão, assim como é um fator que aumenta a irreversibilidade dos processos, potencializando a entropia do sistema. Na câmara de combustão, a turbulência gerada pela adição de combustível e a sua queima, também aumentam a perda de pressão do sistema, que em plantas industriais podem variar entre 2 a 3 por cento.

Como é possível notar pelas formulações das seções anteriores, o calor específico C_p e a natureza do gás γ que podem ser relacionados pela equação [22], tem grande influência no cálculo da eficiência do ciclo e do trabalho útil gerado. Essas constantes, diferente do que foi considerado previamente, variam devido a mudança da composição do gás, após a admissão e queima de combustível na câmara de combustão, e a variação de temperatura.

$$\frac{\gamma - 1}{\gamma} = \frac{R}{M * C_p} \quad (22)$$

Porém, devido à complexidade do cálculo diferencial desses dois parâmetros, é comum se utilizar dois valores fixos: um para a compressão e outro para expansão, já contabilizando a adição de combustível e a nova temperatura.

3.2 Computação em nuvem

3.2.1 Tecnologia

A Microsoft possui um framework chamado .NET, que pode ser descrito de forma sucinta como um conjunto de classes que permite programadores criarem diversos tipos de aplicações como: WPF, Console Applications, Windows Forms e ASP. O ASP.NET é um subconjunto desse framework, que é utilizado para o desenvolvimento de aplicações para Web. É o framework que

será utilizado nesse projeto. Uma aplicação para web é uma aplicação que pode ser acessada por usuários pelo navegador do computador, como Google Chrome, Filezilla ou Internet Explorer. Esse tipo de aplicação possui diversas vantagens, a principal é que a aplicação só precisa ser instalada no servidor para web, sendo necessário apenas a instalação de um navegador para ser acessada de outras máquinas. Essa característica traz diversos benefícios. Primeiro, a facilidade na manutenção e o suporte da aplicação, que só precisa ser feito no servidor. Segundo, a facilidade de acesso dos usuários, que pode ser feita de qualquer lugar com internet. Por último, por ser um sistema multiplataforma, pode ser utilizado no Windows, IOS, Linux, entre outros, já que só necessita do browser e internet para o acesso. No mais, junto com ASP.NET pode-se usar qualquer linguagem da Microsoft, como *CSharp*, *VisualBasic* ou *FSharp*.

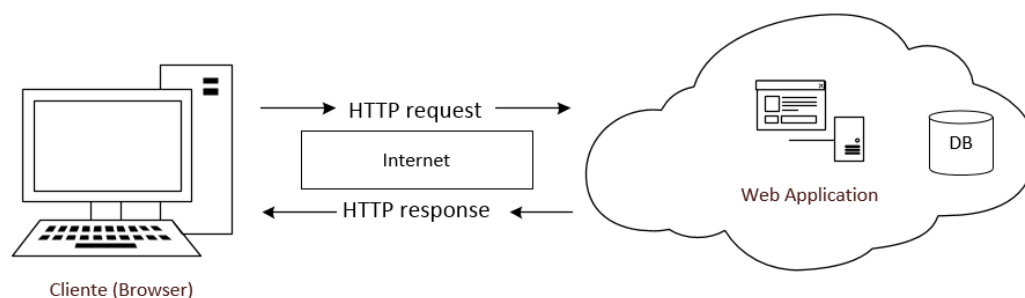


Figura 7: Representação do acesso a aplicação pelo protocolo HTTP

Aplicações para Web utilizam o protocolo HTTP, para acessar aplicações através da internet. Os principais elementos de fluxo da solicitação ao servidor são:

- O método HTTP (Ação a ser executada);
- A página que será acessada (Uma URL);
- Parametros de um formulario ou solicitação.

Enquanto os elementos de fluxo de resposta são:

- Um código de status (no caso de uma comunicação bem sucedida)
- O conteúdo (html, imagens, etc)

O html é uma linguagem de renderização, não possuindo recursos de programação. Interpretado pelo browser, ele define apenas como a informação é organizada e apresentada. É a interface com o usuário na web através de formulários.

3.2.2 Design Pattern

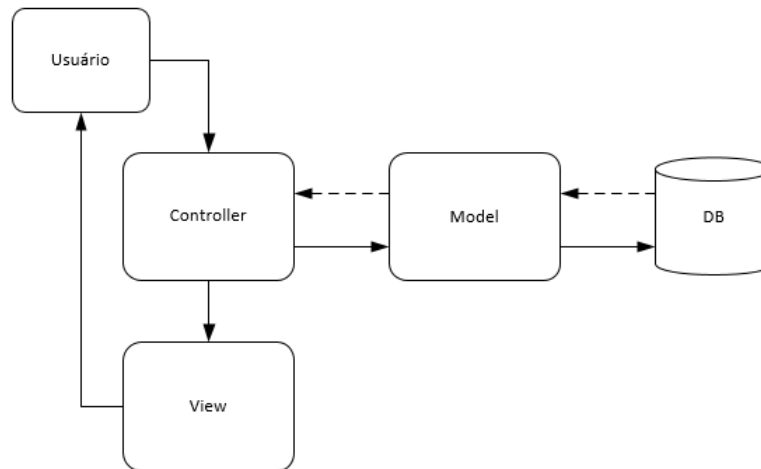


Figura 8: Diagrama de relacionamento do padrão MVC

6

Todas as aplicações, independente de seu tamanho e complexidade, devem seguir um padrão de organização e programação bem estruturados, para facilitar o entendimento e a manutenção do código. A arquitetura Model-view-controller(MVC) para ASP.NET fornece um ambiente robusto e leve, que está integrado aos recursos do ASP.NET. Seu padrão separa a aplicação em 3 principais componentes: model, controller e view. As classes do grupo Controller são as gerenciadoras da aplicação e tem a responsabilidade de:

- Processar solicitações HTTP;
- Fazer verificação dos parâmetros inseridos pelos usuários e executar regras de negócio relacionadas ao input do usuário;
- Identificar os modelos do grupo Model responsáveis pela solicitação do usuário e executa-los;
- Redirecionar as solicitações para o componentes do tipo view correto.

Enquanto as classes Model ficam encarregadas de:

- Gerenciar o acesso a arquivo e a camada de dados;
- Armazenar interfaces e regras de negócio gerais da aplicação;
- Definir regras de validação.

Diferente das classes model e controller, que são da extensão `.cs`(C Sharp), os arquivos do tipo view podem ter várias extensões, como `.cshtml`, `.master`, `.ascx` ou `.aspx`. A parte view da arquitetura MVC é responsável por montar as telas dinamicamente e enviá-las para o browser

no formato .html, que é a linguagem de renderização dos browsers. Nesses arquivos ficam misturados o código html e a lógica de renderização de cada página. É Aconselhado fazer a maior parte da manipulação de dados nas classes controller, enviando a informação para a view da forma mais fragmentada possível. Portanto dentro dos arquivos da view pode-se encontrar:

- Parte do código html para renderização e design da tela;
- Definições de entradas dos usuários como formulários;
- Breve lógica para reprodução rápida das informações.

4 Projeto

4.1 Modelagem de uma turbina a gás

O modelo da turbina a gás utilizado no projeto, foi modelado de acordo com os dados de operação da Usina Termoeletrica Norte Fluminense, e desenvolvido pela equipe da GT2 Energia. Esse modelo segue um padrão de execução definido para cada estágio diferente do procedimento de partida, parada e permanente da turbina, e que veremos a seguir.

Nas entradas do modelo, como pode-se ver no apêndice A, tem-se a indicação de diversos tipos de estado de operação que são utilizados para definir esse padrão de funcionamento da turbina. Esses tipos podem ser vistos na listagem e explicações a seguir.

- Regime de operação
- Modo de operação
- Indicação de sincronização
- Indicação de ignição
- Indicação de purga
- Estado do motor de partida
- Estado do turning gear

O regime de operação da turbina foi dividido em três, turning gear, partida a frio e partida a quente. Turbinas de grande porte como a citada, mesmo quando desligada, mantem uma rotação mínima, forçada por um motor elétrico chamado Turning Gear. Essa funcionalidade serve para evitar desgastes estruturais na turbina e define o nome do primeiro regime de operação.

A diferença entre a partida a frio e a partida a quente se deve ao gradiente de temperatura que se faz muito mais presente quando a turbina está partindo fria. Uma turbina muito grande possui uma massa considerável, demorando a aquecer até uma temperatura permanente. E esse gradiente de temperatura gera uma troca de calor que afeta o desempenho da turbina, tornando a sua contabilização indispensável.

Durante a partida do zero da turbina, ou a partir de uma rotação mínima de 2,47rpm fornecida pelo turning gear, a turbina passa por seis modos diferentes de operação explicitados a seguir.

- Turning gear
- Rampa para a purga
- Purga
- Desaceleração pós purga
- Aceleração de partida sem chama
- Modo com chama até o sincronismo

O segundo estágio é a rampa para a purga da HRSG. Apesar desse texto tratar da simulação de uma turbina a gás em ciclo simples, os dados obtidos para o simulador são da UTENF, que também trabalha em ciclo combinado. Este fato torna obrigatório a purga mesmo em ciclo simples. A HRSG significa "Heat Recovery Steam Generator" que é um sistema trocador de calor que utiliza os gases quentes de exaustão da turbina a gás para aquecer a água da turbina a vapor. Nesse estágio, um motor de partida eleva a rotação da turbina até 638 rpm, quando o modo de operação passa para purga e a turbina mantém a mesma rotação por 505 segundos.

Após o término do tempo necessário para completar o processo, o motor de partida é desligado e a rotação da turbina diminui até 428 rpm. E esta é a parte do processo determinada pelo modo desaceleração pós purga. Ao atingir essa rotação mínima esperada, o motor de partida é religado, e a rotação começa a subir novamente no penúltimo modo de partida da turbina. E é quando finalmente chegando a 517 rpms, se inicia o último modo de operação, onde a ignição começa, e ainda com o motor elétrico, a rotação da turbina aumenta até chegar em 2317 rpm, quando motor elétrico é desligado liberando o controle da rpm da turbina, que segue por conta própria até 3600 RPM.

Depois da estabilização em 3600 rpm há a sincronização com a rede. Ou seja, o gerador elétrico é conectado a rede e começa a transformar o trabalho fornecido pela turbina em energia elétrica.

O simulador descrito nesse texto não recebe controle por parte do usuário, a não ser o comando de parada e partida. Porém, no simulador full scope da usina norte fluminense, no sistema criado pela GT2 Energia, o usuário pode escolher, após a sincronização, três tipos de controle de potência: Minimum Load, Base Load e Operator Load. No primeiro, a turbina simplesmente mantém a mínima potência gerada possível, após a sincronização, que é de 4,5 Mega Watts. Em Base Load a carga da turbina sobe gradativamente até a máxima possível, que no caso da CT da UTENF é de 177 MW com o pré-aquecimento do gás da turbina. Enquanto por último, em Operator Load, é possível escolher a carga desejada e sua derivada em função do tempo.

A programação do modelo da turbina a gás é dividida nos módulos a seguir:

- Combustão

- Composição dos gases
- Configurações
- Funções
- Propriedades
- Organizador

Para se modelar uma turbina a gás segundo o procedimento descrito acima, pode-se inicialmente separar seu funcionamento em dois trechos essenciais, quando a turbina está sendo conduzida pelo motor elétrico de partida, e após a ignição, quando a turbina começa a fornecer potência.

O padrão de funcionamento do motor elétrico é bem conhecido e não há muita variação. A aceleração e desaceleração foram calibradas com diversos pontos de operação, e variam apenas com falhas de entupimento de filtro, porém essa parte não é vista nesse texto. O modelo é chamado de forma recursiva e os parâmetros de entrada informam o estado atual e o anterior sistema. Dessa forma, com o conhecimento do modo de operação atual o modelo sabe qual curva seguir. Desde o momento em que a rotação da unidade é controlada pelo motor de partida, o compressor e a turbina já começam a gerar razões de compressão e expansão. O compressor, como explicado na revisão bibliográfica, possui curvas características relacionando a rotação, razão de pressão e a vazão mássica relativa ao ponto de projeto. E essas curvas podem ser vistas na figura 6. Calibrando esse último termo com os dados da UTENF obtêm-se a razão de pressão em função da rotação, que foi visto nos capítulos anteriores ser tão importante para o desempenho total do sistema. Além dos filtros, o compressor é o primeiro componente da turbina a gás, tendo sua razão de pressão e as propriedades termodinâmicas do ar na sua entrada, que é pressão e temperatura ambiente, pode-se definir a pressão de todos os outros pontos. Pois:

$$P_{02} = P_{01} - \delta P_{Filtro} \quad (23)$$

$$P_{03} = P_{02} - \delta P_{CC} \quad (24)$$

$$P_{04} = P_{01} \quad (25)$$

Foi encontrada a temperatura na saída do compressor, utilizando o método da secante, utilizando a eficiência previamente calibrada pelo compressor real e uma biblioteca que determina o estado termodinâmico de fluidos. "Chutes" arbitrários para valores de γ são utilizados na equação 22 com o método da secante para descobrir o valor de T_{02} representado na figura 5. Verifica-se através da equação 26 o valor de γ para a dada temperatura:

$$\gamma = \gamma_{medio}(T_{02} - T_{01}) \quad (26)$$

Caso o erro entre o valor chutado e o valor encontrado na equação acima não seja satisfatório, o método é refeito com novos valores de "Chutes".

Seguindo para o próximo componente da unidade de turbina a gás, pelo poder calorífico do gás natural utilizado na câmara de combustão e a massa de ar cedida pelo compressor, é feito um balanço de energia na câmara de combustão representado na equação a seguir.

$$h_c = (m_{2c} * h_{2c} + m_f * PCI_{GN})/m_{3c} \quad (27)$$

Depois, novamente com o método da secante, a partir da pressão e entalpia definidos anteriormente, encontramos a temperatura na entrada da turbina.

Como os resultados já obtidos até o momento, pode-se calcular a potência mecânica da unidade fazendo o trabalho gerado pela turbina, equação 10, subtraindo o consumido pelo compressor, equação 12. Enquanto a potência líquida é a soma da potência mecânica da turbina com a potência do motor de partida.

A rotação do sistema também deve ser reajustada mesmo quando o motor de partida está ligado, somando a rotação anterior com a derivada da rotação em função do tempo. A aceleração angular do eixo pode ser calculada com a inércia do mesmo e o torque fornecido pela turbina.

Como já mencionado, a partir de diversos dados de operação obtidos do controlador T3000 da Usina Termoeletrica Norte Fluminense, curvas de operação foram ajustadas para os diferentes componentes da turbina. Dois parâmetros que são fundamentais para indicar o estágio que a unidade de turbina a gás está são: a rotação e a carga gerada. Diversas funções foram utilizadas na modelagem da turbina, porém não foram devidamente explicitadas nesse texto, com o objetivo de simplificar o conteúdo. Dentre essas funções, as principais seriam: as de troca de calor entre os equipamentos para contabilizar as perdas de energia por troca térmica e a contabilização das perdas do compressor pelo Bleed e o Blow off. O Bleed é a vazão de parte do fluxo de ar do compressor direto para as palhetas da turbina, com o objetivo de resfriar as palhetas, que como vimos anteriormente, têm a sua temperatura como limitante de potência.

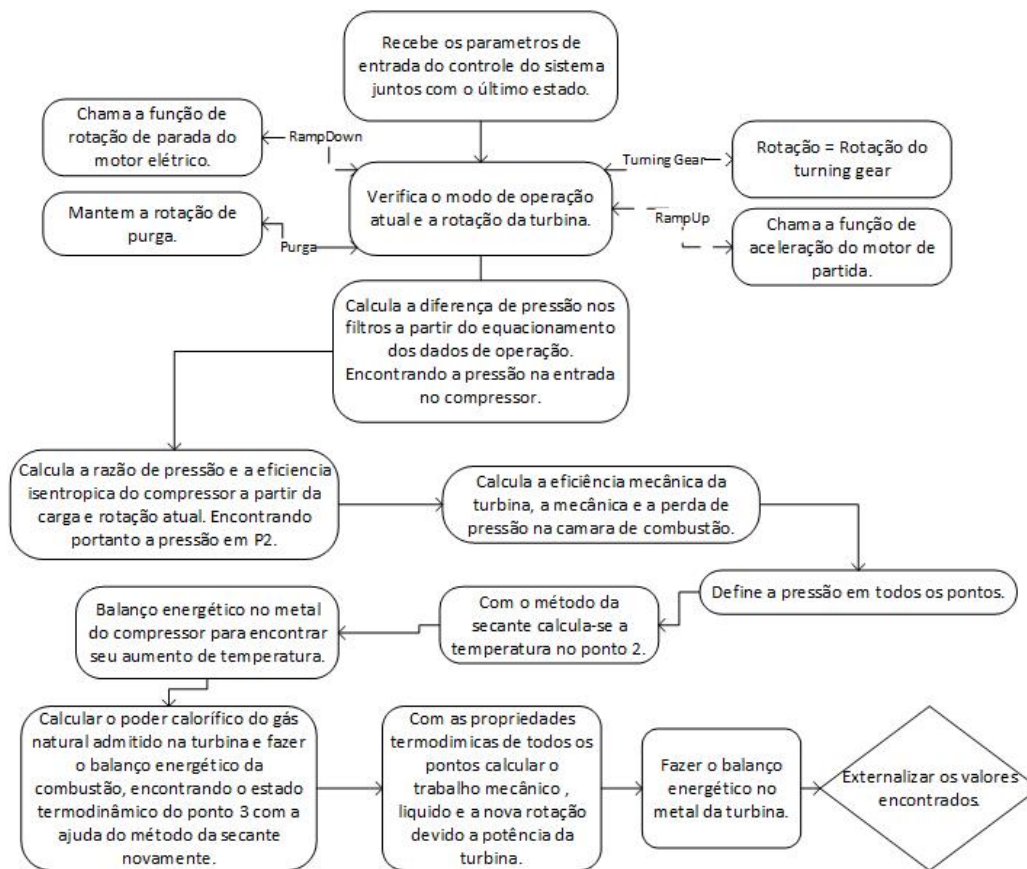


Figura 9: Fluxograma do modelo matemático

7

4.2 Metodologia de programação de simuladores

Um simulador, utilizando qualquer que seja o framework, para web ou para desktop, possui um conceito organizacional prático a ser seguido. As classes fundamentais e suas funções estão definidas na listagem a seguir e nos próximos parágrafos.

- Tag
- Memória compartilhada;
- Fluxograma de execução;
- Integração;
- Métodos comuns.

Ao utilizarmos a tecnologia ASP.NET MVC, essas classes se encaixam perfeitamente no conceito do grupo Model explicado anteriormente. O ASP.NET MVC e a linguagem *CSharp*

possuem diversos recursos úteis para um projeto de simulador para web. Um desses recursos é o Multithreading, que viabiliza o processamento paralelo de diversas informações. Um fluxo principal é responsável por receber solicitações do cliente e processar essas informações da forma mais rápida possível. Quando se vê, por exemplo, que uma aplicação está "travada", isso significa que a thread principal, que é responsável por responder suas solicitações, está ocupada com outra atividade. Quando um requerimento requer um processamento demorado, contínuo, e é simplesmente independente de outros processos, deve-se usar o recurso Multithreading, para melhorar a fluidez da aplicação. Esse conceito de processamento paralelo é importante para simuladores, pois além do fluxo principal, há a necessidade do processamento contínuo dos modelos matemáticos, salvamentos de histórico de simulação e a reprodução de gráficos. É inviável uma aplicação mono thread executar todas essas tarefas.

A classe Tag pode ser considerada a mais básica e essencial da aplicação. Possui apenas três propriedades que são responsáveis por armazenar o nome, a descrição e o valor de qualquer propriedade. A criação dessa classe deve-se a forma fácil de manipular esses dados em conjunto, o que é feito constantemente em toda a aplicação, podendo posteriormente armazenar mais informações desse parâmetro de acordo com a demanda e a complexidade do sistema. Toda a informação da simulação é armazenada na forma de tags, como propriedades termodinâmicas, informações dos modelos e da simulação.

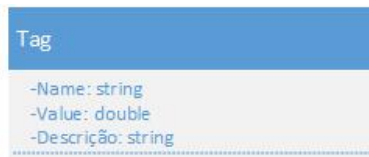


Figura 10: Diagrama da classe Tag

8

A memória compartilhada da aplicação é uma classe *CSharp* estática, que armazena na memória ram todos os dados de operação. Esses dados são acessados a cada passo de integração pelos modelos matemáticos, e a cada requisição dos usuários, portanto necessitam estar sempre disponíveis e de forma rápida. A seguir pode-se ver o diagrama dessa classe e a tabela com a descrição do conteúdo de cada propriedade.

Step	Armazena o passo de integração atual.
Speed	Duração do passo de integração desejado pelo usuário
RealSpeed	Duração do passo de integração alcançado pelo sistema
CIDIM	Numero de condições iniciais de cada subsistema
EDIM	Numero de entradas de cada subsistema
SDIM	Numero de saídas de cada subsistema
SaveScenario	Condição para salvamento de cenário no passo atual
RunMode	Estado da simulação
CLTAG	Lista com as tags de condição inicial de cada subsistema
ENT_TAG	Lista com as tags de entrada de cada subsistema
SALTAG	Lista com as tags de saída de cada subsistema
Mem	Lista de de todos as tags e seus valores atuais

Tabela 2: Tabela de descrição das propriedades da memoria compartilhada

Por ser uma classe estática, ela não pode ser instanciada e suas propriedades e valores são comuns para toda aplicação. Ela é usada para armazenar valores únicos e ser a conexão dos valores obtidos dos modelos matemáticos e as requisições do usuário.

A classe Fluxograma é responsável por gerenciar a simulação de forma geral. Através do método StartSim, ela é chamada por uma thread secundária, que possui um loop condicionado ao fim da simulação pelo usuário. Dentro desse loop estão as principais verificações e funcionalidades da simulação que vem a seguir:

- Chamada dos modelos matemáticos enviando os valores de entrada e recebendo os de saída;
- Atualização das Tags de entrada e saída na memoria compartilhada a partir da saída dos modelos e das operações dos usuários;
- Salvamento em arquivo do valor de todas as tags para gerar histórico;
- Aquisição de dados para gerar gráficos ativos.

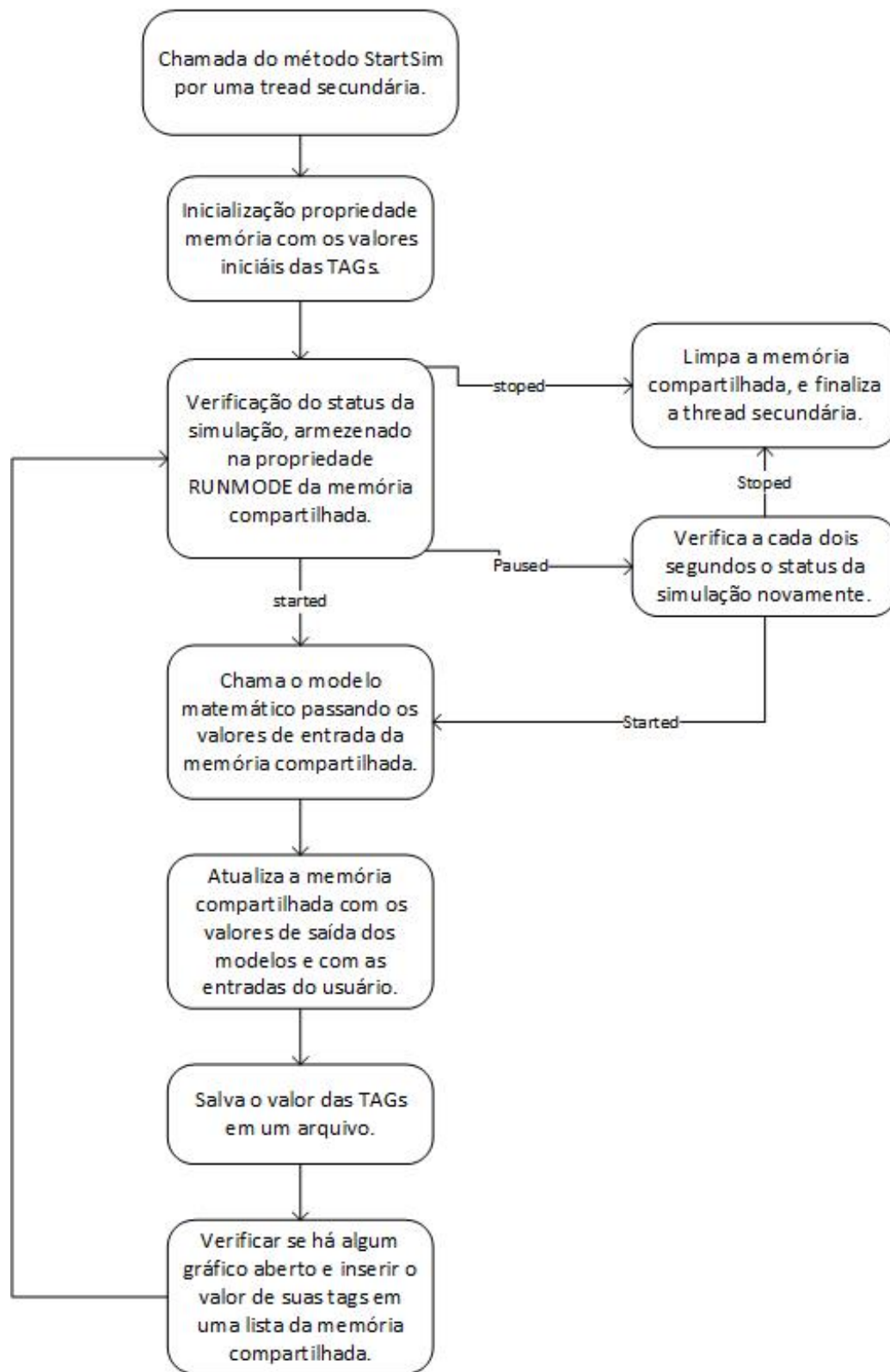


Figura 11: Fluxo secundário dos modelos matemáticos

O simulador desse projeto foi criado em duas linguagens *CSharp* e *Fortran90*. A programação de uma aplicação em mais de uma linguagem deve-se a busca por desempenho computacional aliado com a disponibilidade e praticidade de bibliotecas no mercado. O *CSharp*, como mencionado anteriormente, é compatível com o framework ASP.NET, plataforma escolhida para o simulador na web. Porém, no âmbito de computação numérica é uma linguagem de deixa a desejar. O Fortran por outro lado é uma linguagem amplamente utilizada em computação científica e numérica. Isso devido a sua capacidade e velocidade de lidar eficientemente com vetores e matrizes tão presentes nesse tipo de solução. Desenvolvido de forma que restringe a criação de códigos pouco otimizados e a associação equivocada de variáveis. A classe Integração do simulador possui um nome autoexplicativo. Ela é responsável por integrar os modelos matemáticos que são programados em *Fortran* com o sistema principal que é em *CSharp*. Essa integração é feita através de DLLs (Dynamic Link Libraries), criadas anteriormente com um compilador de Fortran que geram uma biblioteca do modelo matemático no formato (.dll). DLL é um conceito da Microsoft de criação de bibliotecas compartilhadas, esses arquivos podem conter códigos, dados ou ambos. Dlls precisam não podem ser executadas de forma independente, elas necessitam que outro programa do tipo executável as chame, e esses sim podem ser utilizados de forma independente. A classe Integração possui a lógica que adapta as entradas para a interface da Dll e faz a sua chamada. Para chamada do modelo deve-se antes fazer uma conversão dos parametros do *CSharp* que são objetos gerenciados de uma instância para um tipo ponteiro em um bloco não gerenciado de memória antes de fazer a chamada da DLL do fortran.

Com o objetivo de ser a classe de utilidades da aplicação, foi criada a classe *ComumMethod*. Também estática, ela abrigará por sua vez todos os métodos métodos comuns a aplicação que estão listados na tabela a seguir.

ModoExecução	Defini o tipo enum modo execução com Play/Stop/Pause.
SalvarCenário	Salva os valores de entrada, saída e condição inicial dos modelos
LoadSharedMemory	Inicializa a memoria compartilhada com as CIs de um arquivo pré estabelecido
SalvarHistorico	Salva a cada passo de integração os valores da entrada e saída dos modelos
SaveScenario	Condição para salvamento de cenário no passo atual
RunMode	Estado da simulação
ObterCharArray	Converte uma "string"em um vetor de char
ObterString	Converte um vetor de "char"em uma string
SetKKMem	Modifica o valor de um "tag"na memoria compartilhada

Tabela 3: Tabela de descrição dos métodos da classe ComumMethod

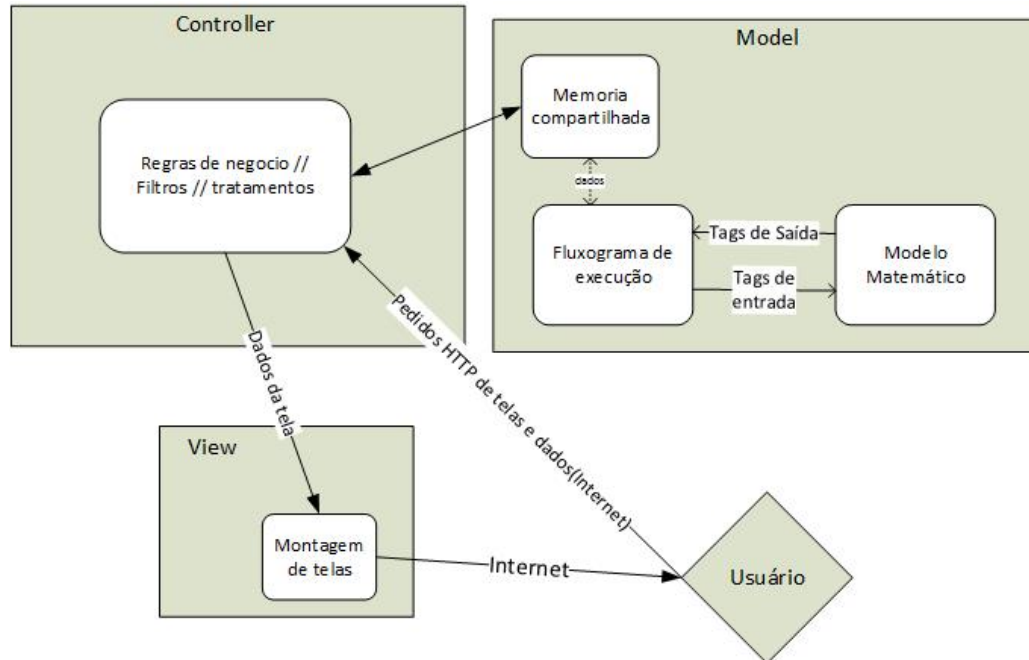


Figura 12: Padrão MVC com suas respectivas classes principais

10

4.3 Configurações e Instalação da aplicação

Para fazer o upload de uma aplicação para web é necessário inicialmente adquirir um domínio e uma hospedagem para aplicação.

Domínio é o nome para identificar um site na internet. Utilizando a tecnologia DNS, que é uma base de dados relacionando o domínio e o endereço do site, dispensando a necessidade da memorização de um complicado código de identificação. Um dos sites repensáveis por disponibilizar o registro de domínios brasileiros é o *www.registro.br*.

A hospedagem do site é a empresa que vai fornecer, é necessário a utilização de servidores disponíveis 24 horas por dia. onde o programador irá instalar sua aplicação. Geralmente essa hospedagem é fornecida em diversos tipos de planos, compartilhados, onde um servidor é compartilhado por aplicações de outro programadores, apesar de um não ter acesso ao código do outro, essa configuração diminui o custo porém compromete a performance, sendo recomendada para aplicações simples e de pouco acesso. É possível contratar planos dedicados, onde um servidor é disponibilizado para a utilização de apenas um usuário, otimizando a performance para o uso de sua aplicação.

Além dessa divisão, há também a questão do gerenciamento do servidor, onde as empresas de hospedagem sempre são responsáveis pelo o hardware da aplicação, enquanto a configuração do software pode variar de acordo com o plano. Há planos de hospedagem que fornecem suporte completo do servidor, e são indicados para aqueles usuários com pouco conhecimento em administração de servidores. Esses planos geralmente fornecessem acesso limitado ao servidor e disponibilizam painéis de controle próprios para instalação da aplicação. Para usuários mais

avançados, a configuração do servidor pode ser painéis de administração difundidos no mercado como Plesk e Cpanel que dão um maior controle ao servidor, ou até mesmo o acesso ao servidor pela conexão remota do Windows. A Microsoft possui o serviço de hospedagem que chama-se Azure e possui uma integração forte com o Visual Studio, facilitando a publicação da aplicação para o servidor e evitando incompatibilidades.

5 Resultados

5.1 Funcionalidades

5.1.1 Simulação da turbina a gás

Os gráficos a seguir representam o valor das principais propriedades da turbina a gás durante a simulação de partida do zero até a geração de 177 Mega Watts. Foram gerados os gráficos da rotação, da potência mecânica, da razão de compressão e da temperatura do fluido de trabalho na entrada e saída de cada equipamento.

Pode-se notar também, que a 1:31 há uma variação brusca em todos os gráficos, isso deve-se a algum tipo de instabilidade do modelo que conseguiu se recuperar rapidamente.

O ar na entrada do compressor está a temperatura ambiente, que no caso da simulação em questão é 20 graus célsius. Essa temperatura varia muito pouco, e mesmo na usina real, a variação só é perceptível em longos períodos de operação. Pode-se ver na figura 13 o valor de T_1 durante a partida.

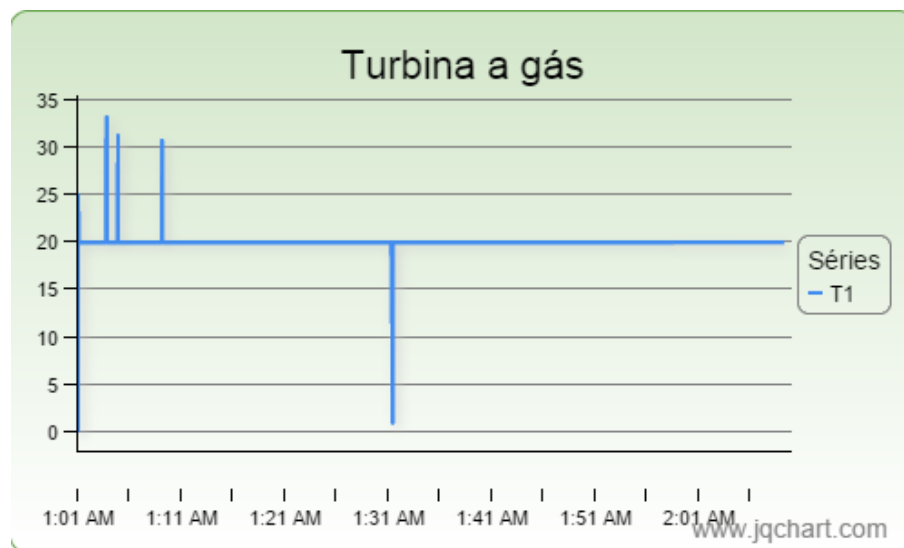


Figura 13: Temperatura do ar na entrada do compressor em função do horário de simulação

11

Os gráficos gerados possuem muitas relações entre si. Comparando o gráfico da figura 14 com o da figura 15, por exemplo, é possível identificar a relação do aumento de temperatura

em T_2 diretamente proporcional a razão de pressão do compressor. Conhecendo a pressão e a temperatura na entrada do compressor, através da equação 8, relacionamos a temperatura a jusante do compressor com a razão de pressão para uma compressão isentrópica.

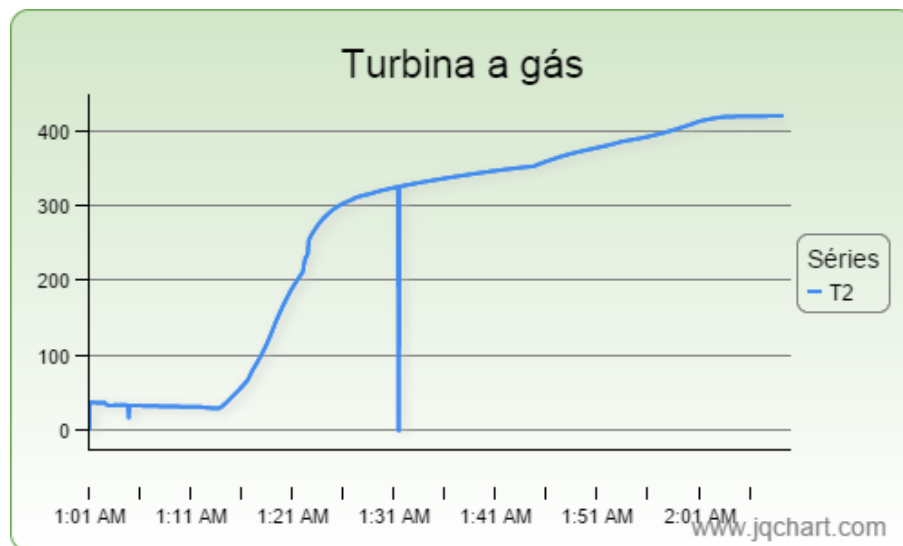


Figura 14: Temperatura na saída do compressor e entrada da câmara de combustão em função do horário de simulação

12

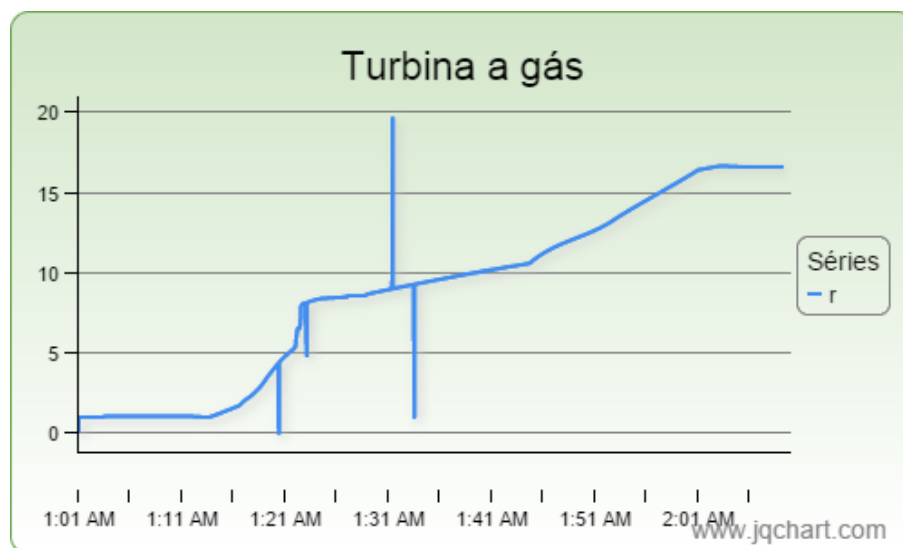


Figura 15: Razão de pressão do compressor em função do horário de simulação

13

A temperatura na saída da turbina começa a subir com o início da ignição a 517 RPM, vide os gráficos das figuras 16 e 18. Apresentando um pico nesse instante, a temperatura oscila

próxima do valor máximo durante a aceleração para a sincronização. Quando ao sincronizar, a temperatura apresenta um valor de mínimo local devido ao aumento repentino na carga da turbina. Após a estabilização, A temperatura volta a subir junto com a potência gerada.

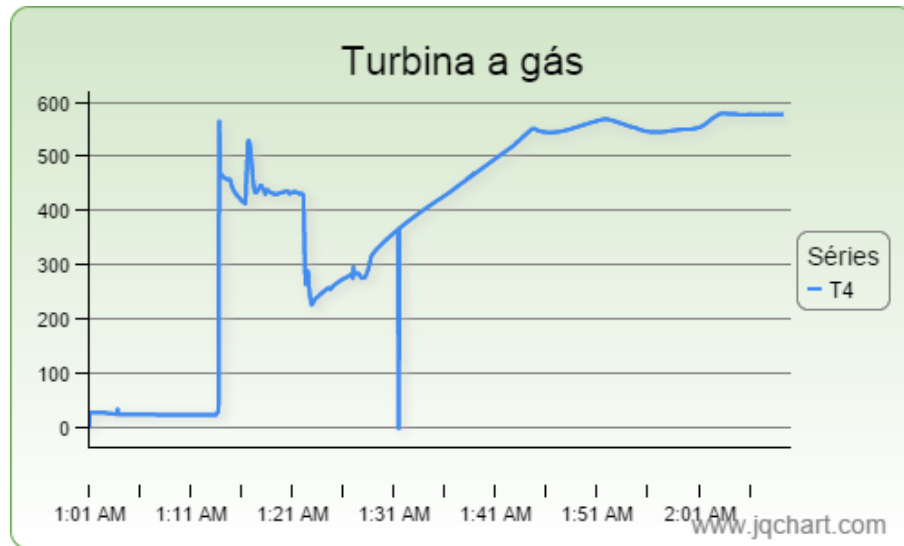


Figura 16: Temperatura de saída da turbina em função do horário de simulação

14

Na curva de potência representada na figura 17, é possível observar que a derivada da potência é constante desde começo da sincronização. A partida representada foi realizada através do comando de Base Load, com uma derivada de aproximadamente $5 \frac{MW}{min}$.

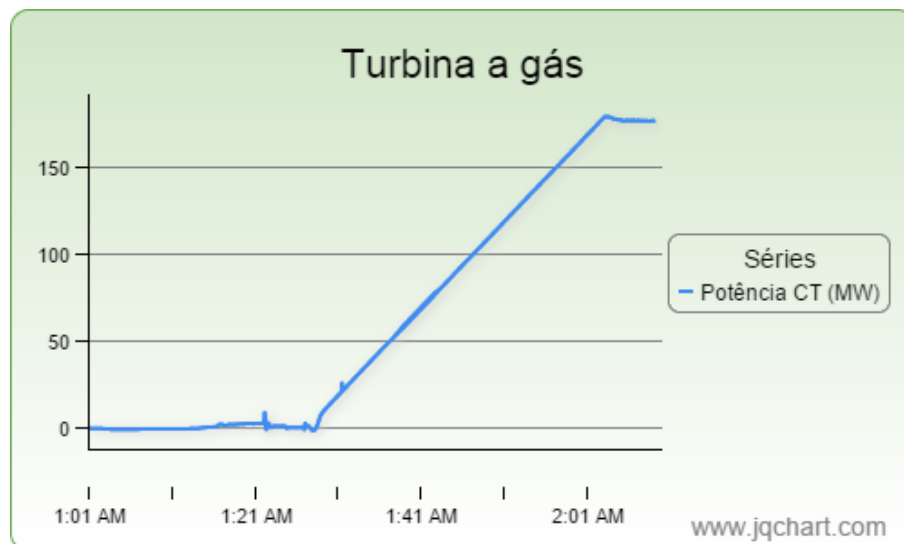


Figura 17: Potência gerada útil

15

O procedimento de partida descrito na seção 4.1, fica evidente nos gráficos das figuras 18, 21, 19,20, que representam respectivamente o gráfico da rotação, o da indicação do modo de operação, e os gráficos de status do turning gear e do motor de partida.

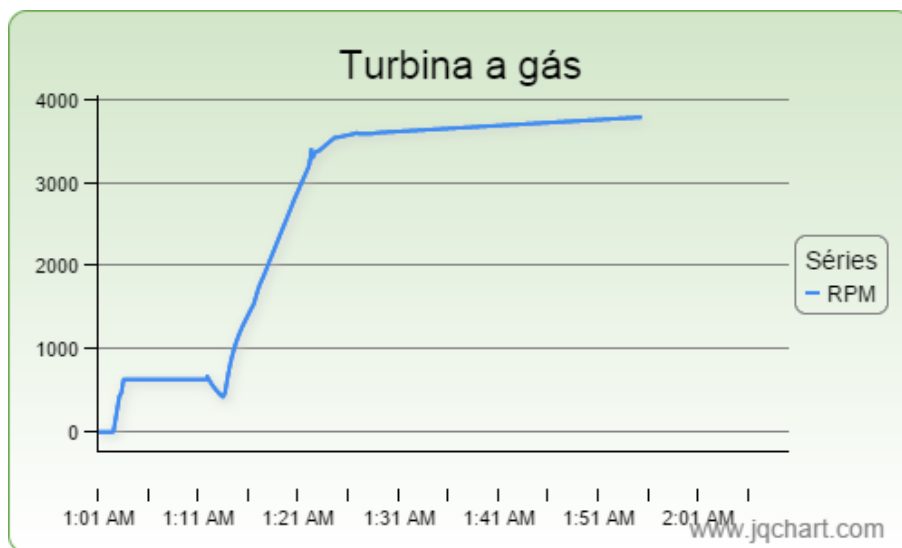


Figura 18: Rotações por minuto da unidade de turbina a gás

16

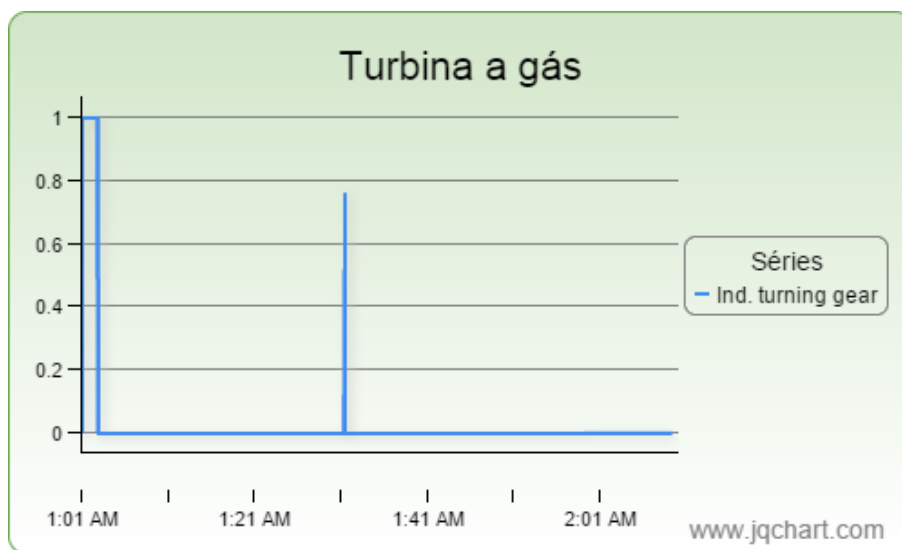


Figura 19: Indicação do status do turning gear

17

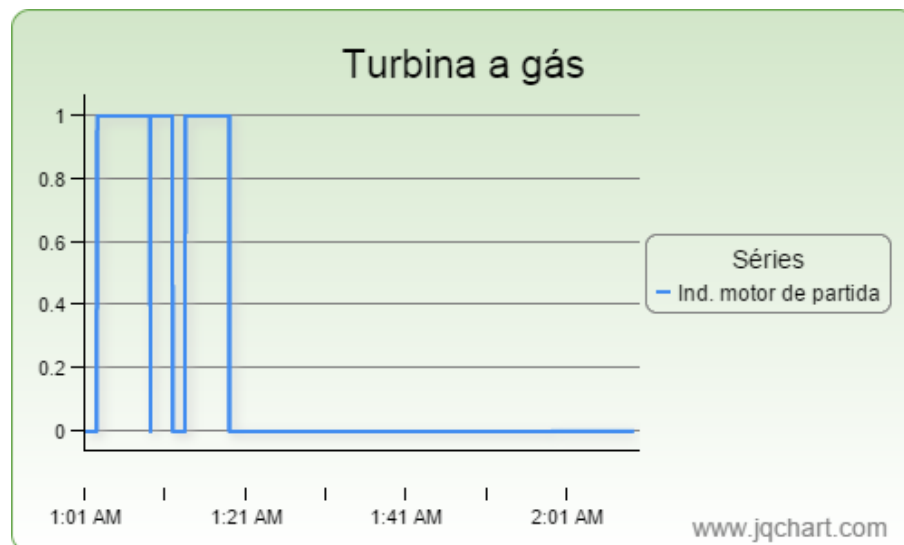


Figura 20: Indicação do status do turning gear

18

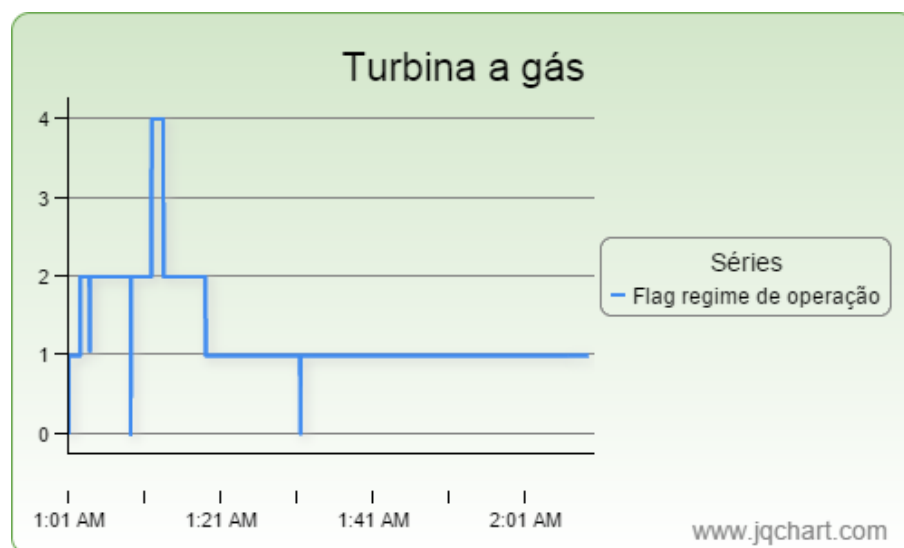


Figura 21: Flag indicador do regime de operação

19

5.1.2 Melhorias futuras

A aplicação criada para web foi simplificada para atender o requisito de tempo do projeto, e portanto, possui poucas funcionalidades de controle para o usuário. Em possíveis versões futuras, o modelo de controle da turbina pode ser implementado e com isso novas funcionalidades poderão ser criadas. Telas características para manobras podem ser criadas, substituindo a versão onde

só é possível ver tabelas de dados e os gráficos dos mesmos. Dando uma experiência mais real da simulação para o usuário.

Referências

- [1] **Jon Galloway**
[https://mva.microsoft.com/en-US/training-courses/introduction-to-asp-net-mvc-8322?
l=nKZwZ8Zy_3504984382](https://mva.microsoft.com/en-US/training-courses/introduction-to-asp-net-mvc-8322?l=nKZwZ8Zy_3504984382)
Acessado em 08/10/15
- [2]
<https://msdn.microsoft.com/pt-br/default.aspx>
Acessado em 08/10/15
- [3] Lotar, A. **Programando com ASP.NET MVC**, 2011.
- [4] Saravanamuttoo, H.; Rogers G., Cohen H.; Straznicky P. **Gas Turbine Theory**, 2011.
- [5] Borgnakke, C.; Sonntag, E. R. **Fundamentos da Termodinâmica**, 2011.