

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – HABILITAÇÃO EM ROBÓTICA E
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Iago Zanuti Biundini

Modelagem Dinâmica de uma Usina Termoelétrica em Ciclo Combinado com
Cogeração

Juiz de Fora
2016

Iago Zanuti Biundini

**Modelagem Dinâmica de uma Usina Termoelétrica em Ciclo Combinado com
Cogeração**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Manuel Arturo Rendón Maldonado.

**Juiz de Fora
2016**

Biundini, Iago Zanuti.

Modelagem Dinâmica de uma Usina Termoelétrica em Ciclo
Combinado com Cogeração / Iago Zanuti Biundini. -- 2016.
76 f.

Orientador: Manuel Arturo Rendón

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2016.

1. Modelagem sistemas de potência.. 2. Termoeletricidade.
3. Turbogeneradores. I. Rendón, Manuel Arturo, orient. II. Título.

Iago Zanuti Biundini

**Modelagem Dinâmica de uma Usina Termoelétrica em Ciclo Combinado com
Cogeração**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 04 de fevereiro de 2016

BANCA EXAMINADORA

Dr. Manuel Arturo Rendón Maldonado - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. João Alberto Passos Filho
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Marco Aurélio da Cunha Alves
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à FADEPE e a Petrobras que financiou esta pesquisa através do projeto de P&D “Desenvolvimento de Modelo para Simulação de Transitórios Eletromecânicos e Termodinâmicos para Avaliação Integrada em Plantas de Co-Geração”, além do meu orientador, o Dr. Manuel Arturo Maldonado Rendon, pela paciência e conhecimento compartilhado nesses meses de pesquisa. Além desses, a minha família e amigos pelo apoio.

RESUMO

Nos últimos anos várias usinas termoelétricas foram construídas no Brasil e a participação percentual da geração termoelétrica no mercado de energia aumentou. Desde a década de 80 vários estudos desenvolveram modelos matemáticos para turbinas a gás (TG), Caldeiras de recuperação de calor (HRSG) e turbinas a vapor (TV) a serem aplicados em análise de sistemas de potência. Alguns destes são representações simplificadas do comportamento estático e dinâmico da máquina, úteis para simular e analisar os seus modos de controle e avaliar o comportamento das plantas. No entanto, trabalhos publicados representam grupos restritos de máquinas e, portanto, estudos específicos exigem modelos mais precisos a serem desenvolvidos. Este trabalho apresenta a modelagem dinâmica de uma planta termoelétrica brasileira com duas TG, duas caldeiras de recuperação e uma TV em ciclo combinado. A abordagem em "caixa cinza" foi empregada, com base em modelos existentes que foram melhorados usando dados amostrados. A modelagem envolve uma abordagem estática e modelagem dinâmica aplicando técnicas de modelagem linear baseadas em dados amostrados. O modelo foi desenvolvido e validado em Matlab-Simulink e pode ser usado para modelar outras usinas semelhantes.

Palavras-chave: Identificação de sistemas. Termoeletricidade. Turbogeneradores.

ABSTRACT

Last years several thermo-power plants were built in Brazil and the percentage participation of thermo-power generation increased in the energy market. Since the 80's several studies developed mathematical models for gas turbines (TG), heat recovery steam generators (HRSG) and steam turbines (TV) to be applied in power systems analysis. Some of these are simplified representations of machines' static and dynamic behavior, useful to simulate and analyze their control modes and to evaluate power plants' behavior in the face of system instabilities. However, published works represent a narrow type of machines groups, and specific studies demand models that are more accurate. This work presents the modeling of a real combined cycle system that exists in a Brazilian thermoelectric power plant composed by two gas turbines, two heat recovery steam generator and one steam turbine in combined cycle. A "grey box" approach was employed, based on existing models that were improved using sampled data. The modeling involves a static approach in steady state and dynamic modeling applying techniques based on sampled data. The model was developed and validated in Matlab-Simulink and may be used to model other similar power plants.

Keywords: System Identification, Thermal power generation, turbogenerator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Turbina a Gás GT11N2.....	15
Figura 2 - UTE - TermoRio.....	16
Figura 3 - Diagrama Esquemático do Bloco estudado na Usina UTE - GLB.....	17
Figura 4 - Diagrama Esquemático e imagem da TG.....	20
Figura 5 - Ciclo de Brayton.....	21
Figura 6 - Modelo de Rowen para TG com VIGV em ciclo combinado.....	23
Figura 7 - Blocos: SetPoint.....	24
Figura 8 - Blocos: Controle de Rotação.....	25
Figura 9 - Blocos: Equação f_2 e Torque no Rotor e na Carga.....	26
Figura 10 – Blocos: Valor Mínimo e Limites.....	27
Figura 11 - Blocos: Controle Local das Válvulas de Combustível.....	27
Figura 12 - Blocos: Atrasos de Combustão, Compressor e Exaustor.....	29
Figura 13 - Blocos: Controle de Aceleração.....	29
Figura 14 - Blocos: Escudo de Radiação e Acoplamento Térmico.....	30
Figura 15 - Blocos: Controle de Temperatura.....	31
Figura 16 - Blocos: Temperatura de Referência e Controle IGV.....	32
Figura 17 – Blocos: Atuador IGV e Ajuste na Temperatura de Referência.....	33
Figura 18 - Modelo implementado no MatLab – Modo Droop.....	35
Figura 19 - Modelo implementado no MatLab – Modo Isócrono.....	36
Figura 20 - Gráfico IGV vs. Potência.....	38
Figura 21 - Ajuste da relação não-linear entre W_f e IGV.....	38
Figura 22 - Modelo de Chaveamento no Controle de IGV.....	40
Figura 23 - Caso 1.....	42
Figura 24 - Caso 2.....	43
Figura 25 – Caso 3.....	44
Figura 26 - Caso 4.....	45
Figura 27 - Esquema da HRSG.....	46
Figura 28 - Blocos: Controle de Rotação e Potência - TV.....	49
Figura 29 - Funcionamento Mecânico Válvula de Vapor à TV.....	49
Figura 30 - Representação de Diagramas de Blocos - Válvula.....	50
Figura 31 - Blocos: f_1 e f_2 da TV.....	50
Figura 32 - Modelo da HRSG.....	52
Figura 33 - Potência simulada no modelo térmico da TG.....	53

Figura 34 - Vazão de gás de exaustão saída da TG modelo DESTUR.....	54
Figura 35 - Fluxo de energia E/S bloco “Atraso do Superaquecedor”	54
Figura 36 - Fluxo de energia E/S bloco “Atraso do Economizador”	55
Figura 37 - Fluxo de energia E/S bloco “Atraso do Evaporador”	55
Figura 38 – Comparação sinais modelo térmico e dinâmico bloco ‘Atraso do Superaquecedor’ ...	59
Figura 39 - Comparação sinais modelo térmico e dinâmico bloco ‘Atraso do Economizador’	60
Figura 40 - Modelo do Controle de Válvula de Vapor e HRSG	63
Figura 41 - Controle de Potência da Turbina a Vapor.....	64
Figura 42 - Caso 1 - HRSG e TV	66
Figura 43 - Caso 2 - HRSG e TV	67
Figura 44 - Caso 3 - HRSG e TV	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores Base utilizados no presente trabalho.....	19
Tabela 2 - Dados da GT11N2.....	21
Tabela 3- Limites de Aplicação – Modelo de Rowen (ROWEN, 1983).....	22
Tabela 4 - Modos de Operação.....	25
Tabela 5 - Valores das Constantes no Sistema de Combustível (ROWEN, 1983)	28
Tabela 6 - Atrasos da Câmara de Combustão (ROWEN, 1983).....	28
Tabela 7 – Valores do Modelo da TG	34
Tabela 8 - Relação de Casos de Simulação - TG	41
Tabela 9 - Valores de Interpolação do Posicionador da Válvula de Cross-Over	50
Tabela 10 - Valores de Interpolação da Relação entre a Posição da Válvula e a vazão de Vapor	51
Tabela 11 - Valores Base utilizados neste trabalho - modelo HRSG na TV	57
Tabela 12 - Entalpia de cada Estagio.....	62
Tabela 13 - Relação de Casos de Simulação – HRSG e TV	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1/R	‘Estatismo (Droop)’ da TV
ARMAX	Modelo auto-regressivo com média móvel e entradas exógenas
ARX	Modelo auto-regressivo com entradas exógenas
BJ	Modelo Box-Jenkins
ECON	Economizador
EVAP	Evaporador
FC	Funções de Correlação
FT	Função de Transferência
GLB	Governador Leonel Brizola
GN	Gás Natural
HP	Estágio de alta pressão na TV
HRSG	Caldeira de Recuperação de Energia
IGV, VIGV	Posição palheta guia de entrada no compressor [°]
IP	Estágio de média pressão na TV
IV	Variável Instrumental
Ligv	Posição do acionador do IGV em [pu]
LP	Estágio de baixa pressão na TV
MQ	Mínimos Quadrados
OE	Modelo Output Error
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P_0	Potência da TV requerida pela rede em [pu]
PCI	Poder Calorífico Inferior
Pmec	Potência Mecânica produzida na Turbina a Vapor em [pu]
pu	Por Unidade
Q_s	Queima Suplementar
REDUC	Refinaria Duque de Caxias
SP, Set Point	Set Point para geração em modo ‘regulador com queda (Droop)’
STG	Energia transferida da vazão dos gases na exaustão para a HRSG em [pu]
SUPQ	Superaquecedor
T_{EX}/TAT	Temperatura de Exaustão da Turbina a Gás em [°C]

TG	Turbina a Gás
TG11	Primeira turbina a gás do Bloco I da UTE-GLB
TG12	Segunda turbina a gás do Bloco I da UTE-GLB
TIT	Temperatura Interna Após Queima do Combustível na Turbina a Gás em [°C]
TQS	Temperatura gases de exaustão após queima suplementar em [°C]
Tra	Temp. referência ajustada temp. ambiente em [°C]
TV	Turbina a Vapor
UTE	Usina Termelétrica
VCE	Demanda de Combustível, valor final enviado às válvulas em [pu]
VIGV	Variable Inlet Guide Vanes
W	Rotação eixo da TV em [pu]
Wext	Vazão do vapor enviado à refinaria REDUC em [pu]
W _f	Vazão de Combustível após atrasos em [pu]
W _{fi}	Vazão de Combustível Corrigido em [pu]
W _{fMIN}	Vazão de Combustível a Vazio em [pu]
WQS	Vazão na queima suplementar em [pu]
W _t	Vazão de vapor entrando na TV em [pu]
W _v	Vazão de vapor saindo de uma caldeira em [pu]
W _{VT}	Vazão de vapor de ambas caldeiras em [pu]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	SISTEMAS DE REPRESENTAÇÃO	18
3.1.	DIAGRAMA DE BLOCOS	18
3.2.	SISTEMA POR UNIDADE	18
3.	TURBINA A GÁS	20
4.	MODELAGEM DA TURBINA A GÁS	22
5.1.	MALHA DE CONTROLE DE ROTAÇÃO.....	24
5.1.1.	Rampa de Variação de Potência Requerida	24
5.1.2.	Controle de Rotação.....	24
5.1.3.	Equação f_2	25
5.2.	SISTEMA DE CONTROLE DE COMBUSTÍVEL.....	26
5.2.1.	Bloco Seletor de Mínimo	26
5.2.2.	Limites de Vazão de Combustível	26
5.2.3.	Ganho de Combustível e Somador de Vazão Mínima.....	27
5.2.4.	Blocos Sistema de Combustível.....	27
5.2.5.	Atraso do Sistema de Combustão	28
5.3.	MALHA DE CONTROLE DE ACELERAÇÃO.....	29
5.4.	MALHA DE CONTROLE DE TEMPERATURA	29
5.4.1.	Equação f_1 – Calculo da Temperatura da TAT	30
5.4.2.	Dinâmica do Escudo de Radiação e Acoplamento Térmico.....	30
5.4.3.	Controlador de Temperatura	31
5.5.	MALHA DE CONTROLE DE TAT/TIT PELA POSIÇÃO DO VIGV	31
5.5.1.	Temperatura de Referência	31
5.5.2.	Controle do IGV	32
5.5.3.	Atuador IGV	32
5.5.4.	Equação f_3	33
5.6.	RESUMO DE MODIFICAÇÕES DO MODELO DE ROWEN.....	33
6.	MODIFICAÇÕES EM RELAÇÃO AO MODELO DE ROWEN	37
6.1.	VAZÃO DE COMBUSTÍVEL EM VAZIO	37
6.2.	VARIAÇÃO DA VIGV.....	37
6.3.	EQUAÇÃO f_1	39
6.4.	EQUAÇÃO f_3	39

6.5.	MUDANÇA NO CONTROLE DE IGV	39
7.	SIMULAÇÃO DO MODELO DA TURBINA A GÁS	41
7.1.	CASO 1	42
7.2.	CASO 2	43
7.3.	CASO 3	44
7.4.	CASO 4	45
8.	HRSG E TURBINA A VAPOR	46
9.	MODELAGEM DA HRSG E DA TURBINA A VAPOR.....	48
9.1.	CONTROLE DA VÁLVULA DE VAPOR DA TURBINA A VAPOR.	48
9.1.1.	Controle de Rotação e Potência	48
9.1.2.	Primeira e Segunda Válvulas e Controle Da Posição	49
9.2.	HRSG	51
9.2.1.	Simulação no modelo térmico da TG no Modelo Térmico	52
9.2.2.	Equação f1, f2 e f3 da HRSG.....	56
9.2.3.	Superaquecedor	58
9.2.4.	Economizador	59
9.2.5.	Evaporador	60
9.3.	MODELO DA PRODUÇÃO DE POTÊNCIA PELOS ESTADOS DA TV.	61
9.3.1.	Atraso de Transporte	61
9.3.2.	Crossover Piping	61
9.3.3.	Fatores de Potência	62
9.3.4.	Extração	62
9.3.5.	Potência Total	62
10.	SIMULAÇÃO DO MODELO DA HRSG E DA TV	65
10.1.	CASO 1	66
10.2.	CASO 2	67
10.3.	CASO 3	68
	REFERÊNCIAS	71

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional, SIN, de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte com tamanho e características que permitem considerá-lo único no âmbito mundial. Apenas 1,7% da energia elétrica requerida pelo país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica. (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2013)

Tradicionalmente o planejamento operacional do SIN, realizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), é condicionado pela aleatoriedade nas fontes hídricas, sendo que a geração com usinas termelétricas é um sistema complementar quando os reservatórios de água estão perto de esvaziar. Segundo dados do ONS em 2014 foram gerados 392 TWh (tera-watt-hora) no sistema Hidroelétrico, enquanto foram produzidas 124 TWh no sistema térmico convencional, sem considerar o sistema de emergência e termonuclear. Isto significa que 31.5% da geração do sistema é termelétrica. Comparando com o ano de 2004, onde o sistema térmico gerou 9,4% observa-se um aumento na participação de centrais térmicas no cenário nacional. (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2013)

Outro fator que favorece o crescimento da geração termelétrica alimentada com gás natural está relacionado com as deficiências e restrições na transmissão da energia gerada em usinas hidrelétricas. Ditas deficiências poderiam ser minimizadas instalando usinas termelétricas em locais próximos da demanda, aumentando a confiabilidade na disponibilidade de energia. (FERNANDES, DE OLIVEIRA, *et al.*, 2008)

Ciclos combinados são definidos pela combinação de dois ciclos térmicos (Brayton e Rankine) em um sistema gerador, para assim conseguir aumentar a eficiência global (KEHLHOFER, RUKES, *et al.*, 2009).

No processo de combustão, a TG produz como saída um gás a alta temperatura que significa energia desperdiçada. O ciclo combinado utiliza esse gás para recuperar a energia térmica através de uma HRSG e assim transferir o calor para a água, transformando-a em vapor que é utilizado posteriormente para acionar uma TV. No ciclo combinado perto de 58% da energia é aproveitada, enquanto no ciclo simples este valor se aproxima de 36% (KEHLHOFER, RUKES, *et al.*, 2009). Dessa forma, além de eficiência, o quesito ambiental também é um grande incentivador das centrais em ciclo combinado, além de outras vantagens

como: baixas emissões de poluentes, curto tempo na montagem e operação comparado com centrais hidrelétricas, menor custo inicial e a possibilidade de variação no uso do combustível.

A modelagem baseada em dados amostrados é empregada em diversas áreas de estudos tais como física, química, biologia, economia e engenharias. É uma das áreas de pesquisa que tenta descrever matematicamente os sistemas e simular seu comportamento com o objetivo de prever o desempenho das suas variáveis. Turbinas para geração de energia elétrica são equipamentos complexos com grandes riscos operacionais, portanto a modelagem é uma ferramenta muito útil para prever futuros riscos e promover melhorias no seu desenvolvimento, e constitui-se parte essencial para o controle, tornando o sistema mais seguro e com melhor desempenho.

O conteúdo desse trabalho consiste em modelar uma central termoelétrica formada por duas TG, cada uma conectada a uma HRSG. Essas duas HRSG geram vapor superaquecido enviado a uma TV. O software de simulação utilizado é o Simulink - Matlab.

O capítulo 2 apresenta as informações sobre a planta real estudada, sua localização e equipamentos instalados na usina.

O capítulo 3 apresenta os sistemas de representação utilizados para a modelagem da planta, sendo estes: diagrama de blocos e sistema por unidade.

O capítulo 4 consiste na análise do primeiro equipamento estudado: a Turbina a gás. Consiste em informações sobre o funcionamento da TG e a apresentação de suas características.

O capítulo 5 descreve o modelo da TG, relatando as informações sobre cada uma das malhas de controle, do sistema de combustível, tendo uma análise de cada sistema de blocos individualmente. Isso tudo a partir dos modelos de Rowen sem VIGV (ROWEN, 1983) e com VIGV (ROWEN, 1992).

O capítulo 6 consiste nas modificações realizadas nos modelos de Rowen para adaptar o modelo da teórica para a TG estudada.

O capítulo 7 consiste nos resultados das simulações da TG.

O capítulo 8 consiste na análise dos outros equipamentos estudados: a caldeira de recuperação de calor e a turbina a vapor. Consiste em informações sobre o funcionamento e a apresentação de suas características.

O capítulo 9 descreve o modelo da HRSG e da TV, relatando as informações sobre cada uma das malhas de controle, tendo uma análise de cada sistema de blocos individualmente.

O capítulo 10 apresenta os resultados das simulações para da HRSG e da TV.

CARACTERÍSTICAS DA PLANTA REAL

A usina termelétrica Governador Leonel Brizola (UTE - TermoRio) está localizada no município de Duque de Caxias - RJ, sendo em julho de 2014 a maior termelétrica a gás natural instalada no Brasil, com 1.040 MW de capacidade instalada. Propriedade da Petrobrás a usina é composta por três blocos de geração termelétrico cuja produção representa 22% da energia total produzida no estado do Rio de Janeiro. Possui 2.958,46 m² de área construída. Cada bloco de geração está composto por duas TG, duas HRSG e uma TV.

Cada uma das duas TG modelo GT11N2, como mostrada na Figura 1, possuem um único eixo compressor-turbina. O eixo da compressor-turbina carrega os quatro estágios da turbina e os quatorze estágios do compressor. Os primeiros dois estágios da turbina são resfriados com ar da descarga do compressor. O ar da refrigeração também resfria o eixo da turbina e a base de todas as pás. As TG's são alimentadas com combustível gasoso e possuem o sistema de VIGV (*Variable Inlet Guide Vanes* ou palhetas Variáveis de entrada) no compressor para regular a entrada de ar nas máquinas. (ALSTOM (SWITZERLAND) LTD, 2007)

Figura 1 - Turbina a Gás GT11N2



Fonte: ALSTOM, 2007

As duas HRSG's são de configuração vertical.

O bloco I da UTE – GLB tem características distintas em relação aos blocos II e III por possuir sistema de extração de vapor para fins industriais, utilizando para alimentar a refinaria de Duque de Caxias, REDUC. Dessa forma, por ter características distintas, foi escolhida para a análise deste trabalho.

A TV modelo DKE2-2N30 consiste em um bloco de alta pressão (HP) com extração de vapor e um bloco de baixa pressão (LP) de fluxo duplo. Depois do bloco de HP uma parte do vapor é enviado para a REDUC. A rotação nominal das TG's e da TV é de 3600 rpm.

Na Figura 2 observa-se a UTE – GLB em uma imagem aérea e na Figura 3 encontra-se o esquemático da planta.

Figura 2 - UTE - TermoRio

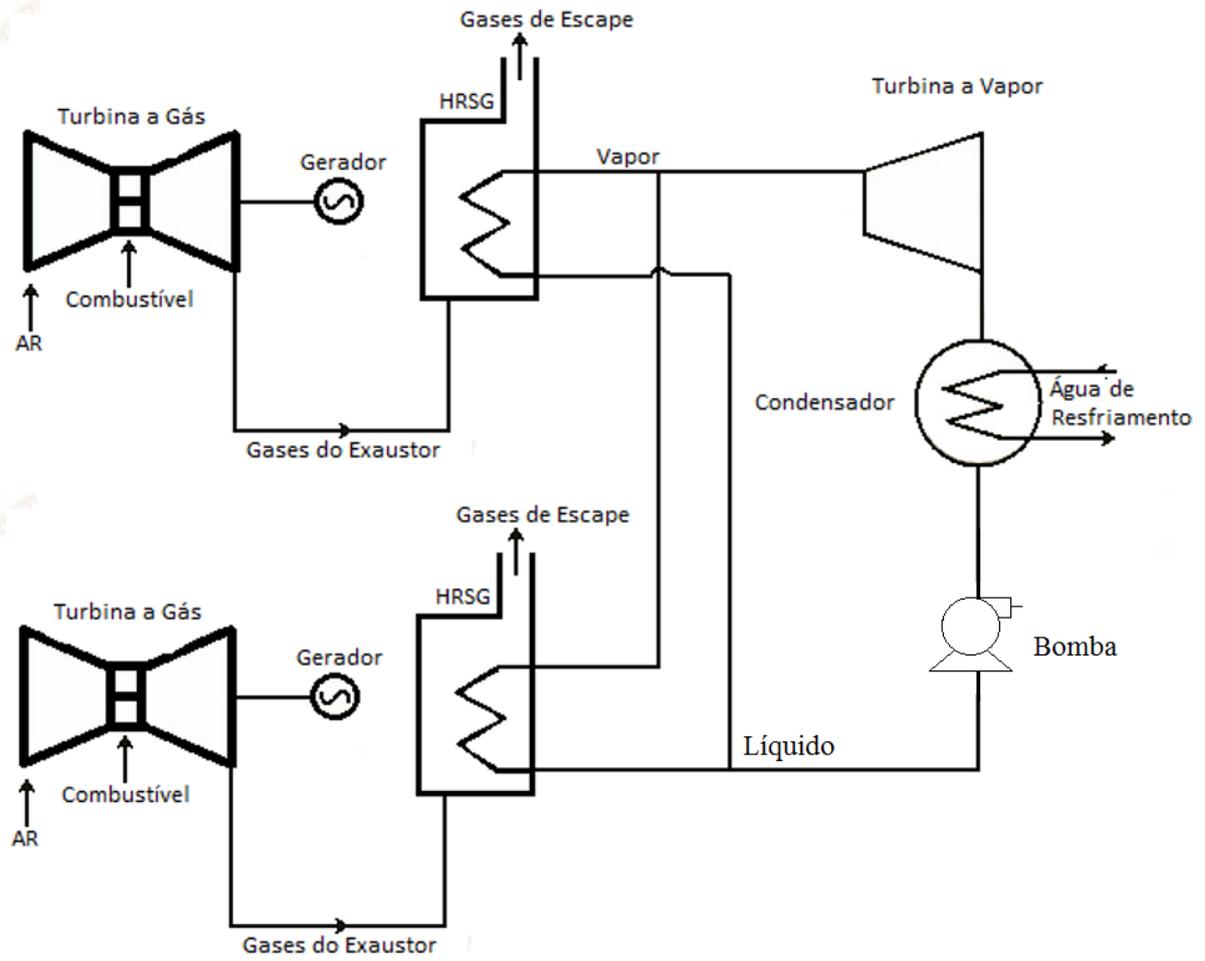


Fonte: LOPEZ MARINHO ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES LTDA., 2012

Uma usina deste tipo é comumente operada em carga base, porém é importante modelar a operação tanto em condições nominais como em carga parcial para conseguir um ajuste adequado no sistema de controle e maximizar o desempenho.

O regime transitório pode ser definido como o período de transição de uma condição em regime permanente para uma nova condição. A simulação em regime é necessária, pois representa as condições iniciais prévias a eventos dinâmicos. Mesmo que a turbina só funcione uma pequena parte da sua vida útil no transitório é nele que as instabilidades estão mais propensas a ocorrer, justificando a necessidade de uma modelagem adequada.

Figura 3 - Diagrama Esquemático do Bloco estudado na Usina UTE - GLB



2. SISTEMAS DE REPRESENTAÇÃO

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando a ferramenta Simulink – Matlab. Dessa forma foram utilizados dois critérios para representar os sistemas: Diagrama de Blocos e Sistema Por Unidade.

3.1. DIAGRAMA DE BLOCOS

Uma função de transferência é a representação matemática da relação entre a saída e a entrada de um sistema dinâmico. A representação mais comum é a transformada de Laplace para sistemas no tempo contínuo e transformada Z para sistemas no tempo discreto.

A transformada de Laplace é uma ferramenta matemática utilizada para resolver equações diferenciais ordinárias com coeficientes constantes, sendo definida por:

$$\mathcal{L}\{F(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-st} F(t) dt$$

Dessa forma, utilizando a variável no domínio da frequência “s”, pode-se representar sistemas lineares ou linearizados. Cada sistema é representado por uma função de transferência que pode ser considerado um subsistema, como controlador, planta, sensor, entre outros, de um sistema principal (OGATA, 2011).

Diagrama de blocos é a representação gráfica do processo de um sistema complexo. Através de figuras geométricas e ligações, é possível descrever as relações entre cada subsistema e o fluxo de informação. Dessa forma é possível interligar diversos subsistemas e simplificar a modelagem e controle de um sistema complexo em pequenos sistemas mais simples (OGATA, 2011).

3.2. SISTEMA POR UNIDADE

Sistema por unidade é uma forma de expressar as grandezas de um sistema de geração, transmissão ou distribuição de energia de forma normalizada, com base em valores pré-determinados.

Utilizando valores em por-unidade “pu” as variáveis sempre estarão normalizadas possibilitando que o desenvolvimento não se preocupe com unidades, e facilitar o cálculo das variáveis do processo.

Para transformar uma grandeza em *pu* somente é necessário dividir a variável pela grandeza base. Caso o inverso seja necessário, é só multiplicar pela grandeza base.

Nesse trabalho as grandezas descritas na Tabela 1 foram normalizadas com seus respectivos valores base. Foram utilizados os valores de PCI do GN: 47,7 [MJ/kg], a massa específica do GN: 0,8 [kg/Nm³] e o calor específico à pressão constante (C_p) do gás de exaustão: 1,1 [J/kg*K]

Tabela 1 - Valores Base utilizados no presente trabalho

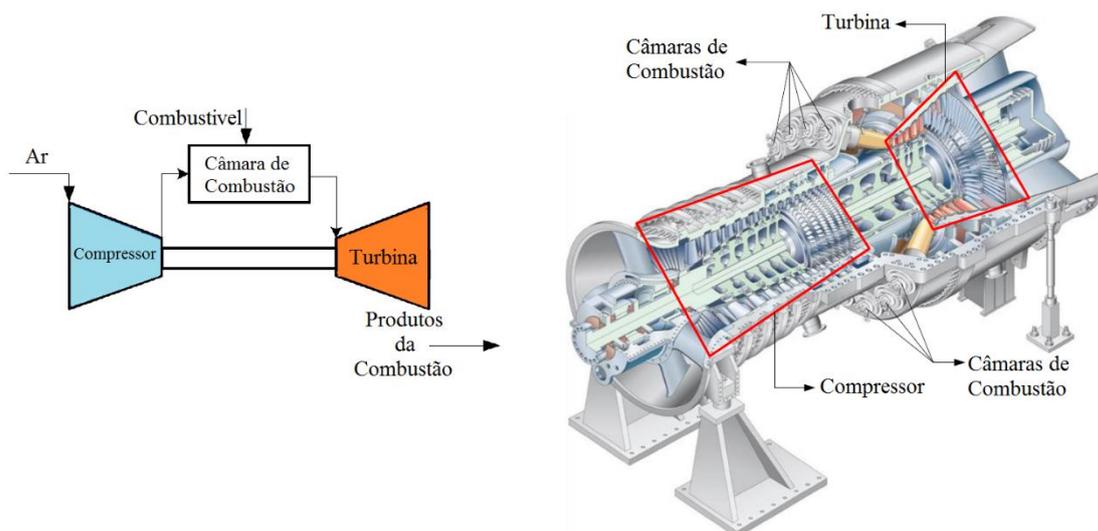
Variável	Valor Base	Unidade
Potência Base da TG	106,1	MW
Vazão de Combustível na TG	342,4 7,2	MJ/s kg/s
Rotação Base das TG e TV	3600	RPM
Vazão de Gás de Exaustão na Saída da TG	365,9 393,0	MJ/s kg/s
Potência base do vapor gerado em ambas HRSGs	624,4	MJ/s
Vazão de GN/energia nominal queima suplementar	11500 104,3	m ³ /h MJ/s
Vazão de vapor/energia nominal para uma HRSG	320,2 312,2	Ton/h MJ/s
Vazão de vapor/energia total nominal em ambas HRSGs	640,4 624,4	Ton/h MJ/s
Vazão de vapor/energia entrando na TV	640,4 624,4	Ton/h MJ/s
Vazão de vapor/energia extraído para a REDUC	198,4 178,9 0,3	Ton/h MJ/s pu
Potência nominal na TV	169,9	MW

3. TURBINA A GÁS

As TG possuem esse nome por ser o gás o fluido de trabalho utilizado na turbina. A palavra gás não se refere à queima de gases combustíveis e sim ao fluido que aciona o movimento do eixo. O combustível pode ser gasoso, como gás natural ou gás liquefeito de petróleo (GLP), ou líquido como querosene, óleo diesel e até mesmo óleos mais pesados.

As TG são máquinas térmicas que podem ser aplicadas na geração elétrica, ou na propulsão de aviões, navios e automóveis. Estes equipamentos se diferenciam das turbinas hidráulicas pela independência da disponibilidade de fontes hídricas, além da baixa razão volume versus potência. As TG possuem instalações mais simples em comparação com as TV por não necessitarem de um processo intermediário para gerar o vapor. (PUC - RIO). Na Figura 4 pode-se ver um esquemático da TG.

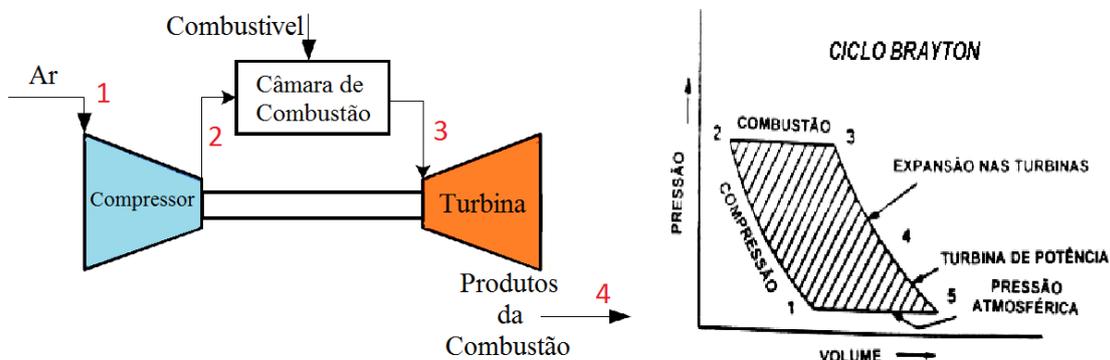
Figura 4 - Diagrama Esquemático e imagem da TG



As variações de pressão e temperatura que ocorrem na TG podem ser explicadas aproximadamente pelo ciclo de Brayton com quatro etapas. Na primeira o ar é aspirado pelo compressor onde ocorre compressão isentrópica, com aumento de temperatura e pressão, e o consequente aumento de entalpia. Esse fluxo de ar pode ser controlado ou não pela ação do VIGV que são palhetas que alteram a geometria interna do compressor modificando a vazão de ar. Na segunda etapa, esse ar comprimido é direcionado para as câmaras de combustão onde mistura-se com o combustível possibilitando queima a pressão aproximadamente constante. Na terceira etapa, os gases a alta pressão e alta temperatura saem da câmara de combustão e se expandem isentropicamente conforme passam pela TG. Na medida em que o fluido exerce trabalho sobre as palhetas reduzem-se a pressão e temperatura dos gases,

gerando potência mecânica rotacional no eixo. A energia é transformada no eixo da TG por um gerador elétrico, e parte da energia é usada para acionar o compressor. A quarta etapa não ocorre diretamente na TG, representa a transferência de calor do fluido para o ambiente (QUEIROZ e MATIAS, 2003). No esquemático da Figura 4 pode-se ver os pontos dos três estágios do ciclo de Brayton na TG. Na Figura 5 observa-se a relação pressão versus volume do ciclo de Brayton ideal e cada um dos estágios na TG. A energia de entrada ao ciclo é dada pelo combustível.

Figura 5 - Ciclo de Brayton



Fonte: QUEIROZ e MATIAS, 2003

As TG's industriais podem ser divididas em dois tipos: pesada (heavy-duty) e aeroderivativas. O primeiro tipo foi desenhado com o principal objetivo de produzir energia elétrica estacionária, enquanto as aeroderivativas são equipamentos inicialmente desenvolvidos para uso aeronáutico, posteriormente adaptados para a produção de energia elétrica. A principal diferença entre os tipos de TG é o tamanho, as turbinas aeroderivativas tem massa e volume reduzidos. Já as industriais têm maior robustez, menor custo e maior flexibilidade no combustível, além de atingir potências maiores (SULATO). A TG no presente estudo é uma ALSTOM modelo GT11N2, e é uma turbina de tipo heavy-duty.

Tabela 2 - Dados da GT11N2

Frequência de Operação	60/50 Hz
Potência	115 MW
Temperatura de Operação	-40°C a 50°C

Fonte: (ALSTOM (SWITZERLAND) LTD, 2007)

4. MODELAGEM DA TURBINA A GÁS

Como ponto de partida para a modelagem da TG no presente estudo foi utilizado o modelo descrito por Rowen em um trabalho em 1992 para uma TG da General Electric. (ROWEN, 1992) com a presença de VIGV. Além do modelo com VIGV foi utilizado um trabalho anterior de Rowen (ROWEN, 1983) sem a presença de VIGV, já que as informações em relação as malhas de controle utilizado no trabalho de 1992 estavam descritas nesse documento.

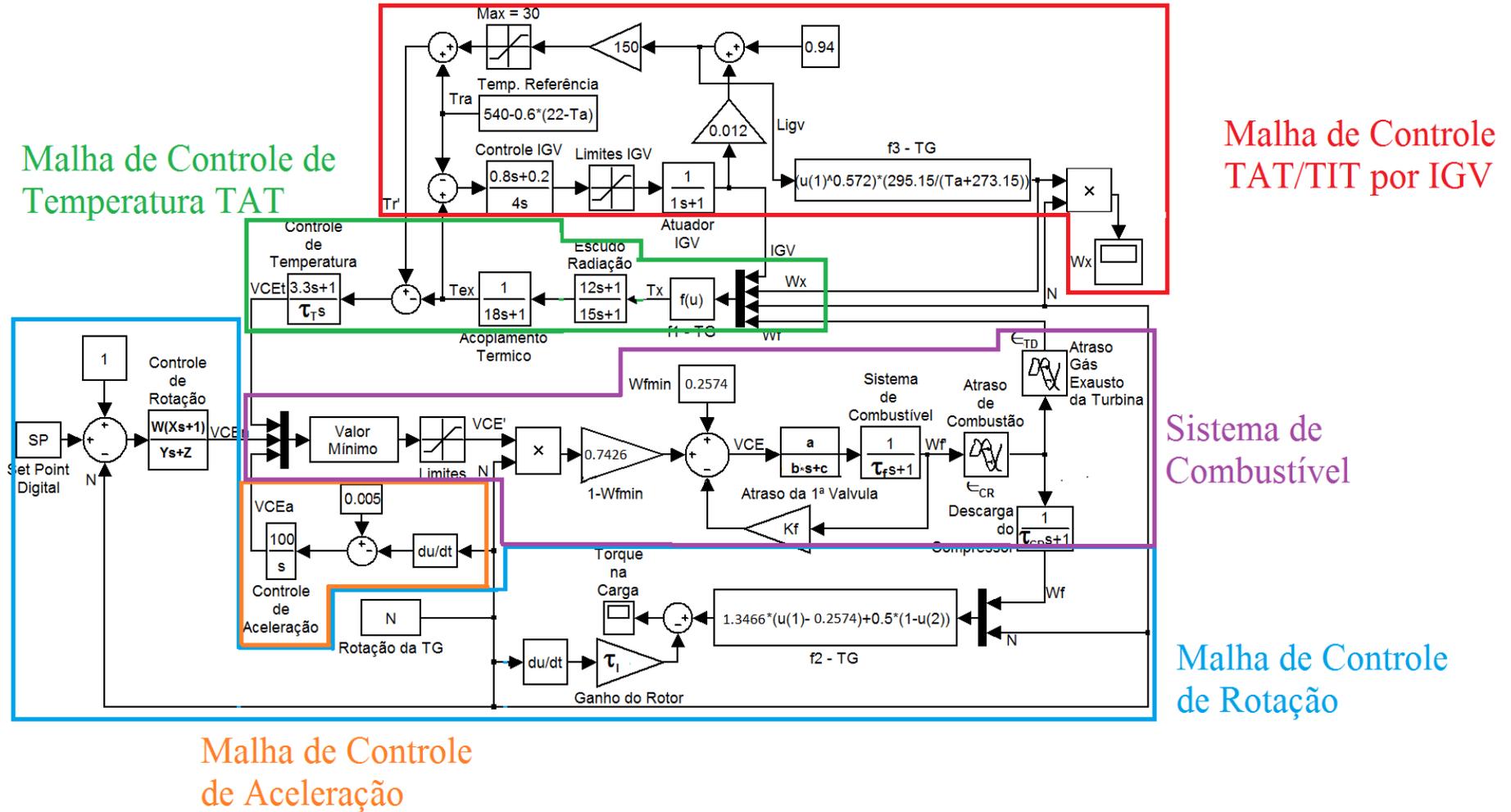
Na Tabela 3 estão listadas as condições de funcionamento do modelo.

Tabela 3- Limites de Aplicação – Modelo de Rowen (ROWEN, 1983)

1	Faixa de Rotação de 95 a 107 por cento da Rotação nominal
2	Temperatura ambiente: 15°C e pressão atmosférica de 101325kPa

Na Figura 6 pode-se ver o modelo de Rowen para a TG em ciclo combinado e com VIGV junto a seus elementos. O modelo possui 4 malhas de controle: Controle de Rotação, Controle de Aceleração, Controle de Temperatura TAT e Controle de Temperatura TAT/TIT por VIGV.

Figura 6 - Modelo de Rowen para TG com VIGV em ciclo combinado



Fonte: ROWEN, 1992

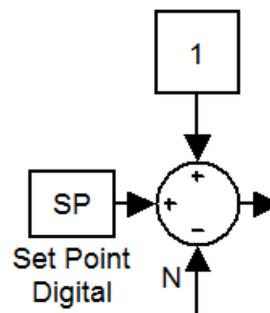
5.1. MALHA DE CONTROLE DE ROTAÇÃO

A malha de controle de rotação, pretende manter a rotação no valor nominal independente da condição de operação da TG. Na Figura 6 está representada pela cor azul.

5.1.1. Rampa de Variação de Potência Requerida

Em (ROWEN, 1983) afirma-se que usualmente os valores de potência gerados na TG operando em paralelo com a rede elétrica sofrem variações contínuas de tipo rampa ascendente ou descendente. Dessa forma a variação no SetPoint deveria ser em forma de rampa. O *setpoint* é proporcional a potência requerida pela máquina, sendo 0 para a produção de 0MW e o *Droop* máximo estipulado (no caso estudado 5%) para a potência base. A Figura 7 apresenta o bloco de Set Point na demanda de potência para a TG.

Figura 7 - Blocos: SetPoint

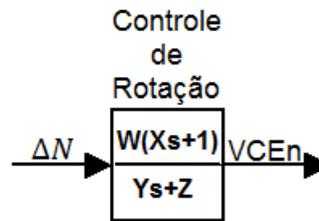


5.1.2. Controle de Rotação

O bloco de Controle de Rotação compara a rotação da TG (N) com o *SetPoint*. Essa comparação gera o erro de rotação da TG (ΔN).

A saída do bloco é a vazão de combustível requerido pelo controle de rotação (VCE_n). Na Figura 8 observa-se o diagrama de bloco do controle de rotação.

Figura 8 - Blocos: Controle de Rotação



As variáveis W , X , Y e Z na Figura 8 tem valores dependendo de cada modo de operação com o qual a TG trabalhará, sendo estes modo isócrono e modo em paralelo (*Droop*). Esses valores são descritos na Tabela 4. K_D é tipicamente 25 para *droop* (diferença em relação a velocidade de referência que irá incrementar o fluxo de combustível, mesmo com a rotação fixa pela rede, gerando um aumento de potência) de 4%. O *droop* é comumente ajustado de 2% a 10%. No SIN é definido 5%.

Tabela 4 - Modos de Operação

Tipo	W	X	Y	Z
Paralelo	$1/K_D$	0	0,05	1
Isócrono	30	2,5	0,10	0

A Figura 19 apresenta as malhas de controle em modo isócrono, quando a TG opera de forma ilhada com o sistema elétrico.

Já na Figura 18 está presente o modelo em modo paralelo. Esse modelo é utilizado quando a TG está gerando em paralelo com o sistema elétrico, que impõe a frequência que vai condicionar a rotação da TG. Dessa forma o *SetPoint* vai definir a potência ativa gerada pela TG.

5.1.3. Equação f2

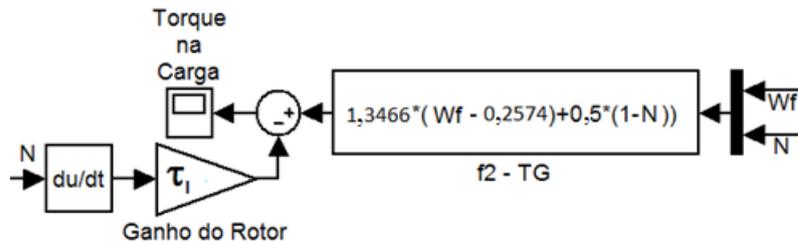
A equação f_2 do modelo na Figura 6 recebe como entradas a vazão de combustível da TG (W_f) e a rotação da TG (N), tendo como saída o torque da TG. A equação f_2 é apresentada na Equação 1:

$$\tau_{Turbina} = \frac{1}{1 - W_{fmin}} * (W_f - W_{fmin}) + 0,5 * (1 - N) \quad (1)$$

W_{fmin} é a vazão de combustível mínimo para o funcionamento da turbina.

Na Figura 9 observa-se o diagrama de blocos do modo *Droop* da equação f_2 e do torque do rotor.

Figura 9 - Blocos: Equação f_2 e Torque no Rotor e na Carga



5.2.SISTEMA DE CONTROLE DE COMBUSTÍVEL

O sistema de controle de combustível tem como objetivo controlar a vazão de gás natural para regular a rotação, a temperatura de exaustão (TAT) ou a aceleração do eixo. Para isto utiliza as malhas de controle do sistema: Malha de Controle de rotação, malha de controle de aceleração e malha de controle de temperatura na exaustão (TAT). Na Figura 6 está representada pela cor roxa.

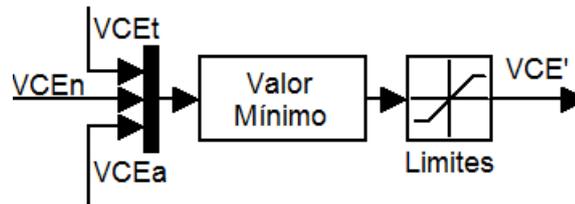
5.2.1. Bloco Seletor de Mínimo

O bloco seletor de mínimo selecionar a variável de menor valor para demanda de combustível do controle de temperatura (VCE_t), do controle de rotação (VCE_n) ou do controle de aceleração (VCE_a). O controle de rotação vai agir a maior parte do tempo, exceto quando existir uma aceleração acima do limite permitido, ou quando a temperatura dos gases na exaustão se encontrarem acima do valor limite definido pelo fabricante. Na Figura 10 observa-se o bloco de valor mínimo.

5.2.2. Limites de Vazão de Combustível

O bloco Limites representa a faixa de valores para a demanda de combustível. A saída do bloco é a demanda de combustível enviada ao sistema de combustível (VCE'). Na Figura 10 observa-se o bloco limite para demanda de combustível.

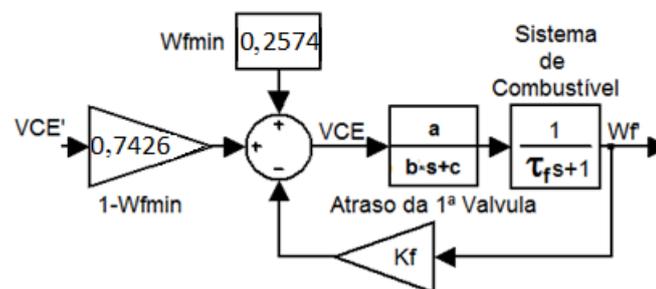
Figura 10 – Blocos: Valor Mínimo e Limites



5.2.3. Ganho de Combustível e Somador de Vazão Mínima.

A TG precisa de uma vazão de combustível mínima para manter a rotação do eixo quando opera em vazio. Esse valor é chamado de Vazão de combustível a vazio (W_{fmin}). A variável demanda de combustível (VCE') é escalada multiplicando-a pela constante “ $1-W_{fmin}$ ”. Após feito o ajuste a variável representa o valor de setpoint enviado ao posicionador da válvula de combustível. Na Figura 11 observa-se o ajuste.

Figura 11 - Blocos: Controle Local das Válvulas de Combustível



5.2.4. Blocos Sistema de Combustível

O sistema de combustível possui inicialmente um bloco FT de primeira ordem que representa a dinâmica no posicionador da válvula de combustível. Após ele outro bloco FT de primeira ordem que representa o escoamento do combustível na válvula, tubulações até chegar à câmara de combustão. O bloco de realimentado com ganho K_F depende do tipo de combustível utilizado, no caso de TG com combustível gasoso não é utilizado. Os valores utilizados no presente trabalho são os recomendados em ROWEN, 1983 e podem ser vistos na Tabela 5. Foram utilizados os valores da primeira linha da tabela

Tabela 5 - Valores das Constantes no Sistema de Combustível (ROWEN, 1983)

Tipo	Modelo de TG da General Electric	a	b	c	τ_F	K_F
Gás	Todos	1	0,05	1	0,40s	0
Líquido	5&6	10	1	0	0,10s	1
Líquido	7&9	1	0,20	1	0,10s	0

5.2.5. Atraso do Sistema de Combustão

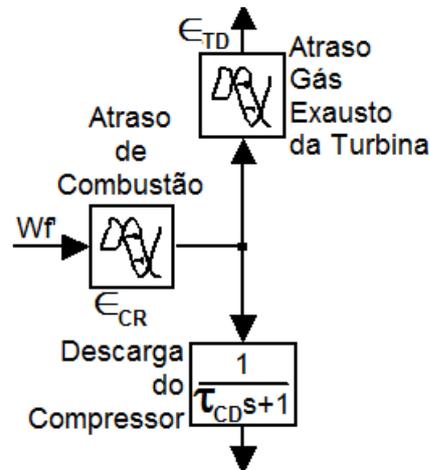
O bloco na Figura 12 representa o atraso pelo escoamento do combustível que entra na câmara de combustão (W_f) a queima e consequente liberação de energia ao gás na combustão. O valor utilizado para o atraso representado por ϵ_{CR} pode ser visto na Tabela 6, obtido de ROWEN, 1983 para diferentes modelos de TG da General Electric GE. Posteriormente a vazão de combustível sofre um atraso pelo escoamento do gás até chegar ao exaustor da TG, representado pelo bloco “Atraso Gás Exausto da Turbina” na Figura 12. Esse bloco forma parte da malha de controle de temperatura TAT , com tempo de atraso ϵ_{TD} . Outro atraso é devido ao escoamento dos gases na descarga da combustão, e forma parte da malha de controle de rotação. O bloco é uma FT de primeira ordem com constante de tempo τ_{CD} e está indicado na Figura 12.

Na Tabela 6 podem ser vistos os diferentes tipos de atrasos para os modelos utilizados por Rowen (ROWEN, 1983). A TG estudada possui potência próxima dos modelos 7 & 9, portanto foram utilizados os valores da segunda linha.

Tabela 6 - Atrasos da Câmara de Combustão (ROWEN, 1983)

Modelo de TG da General Electric	ϵ_{CR}	τ_{CD}	ϵ_{TD}
5 & 6	0,01s	0,10s	0,02s
7 & 9	0,01s	0,20s	0,04s

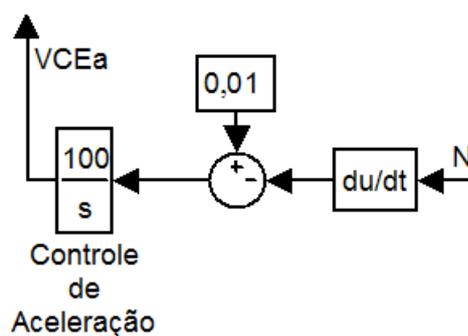
Figura 12 - Blocos: Atrasos de Combustão, Compressor e Exaustor



5.3.MALHA DE CONTROLE DE ACELERAÇÃO

A malha de controle da aceleração, representada pela cor laranja na Figura 6, regula a aceleração da TG para não ultrapassar níveis definidos pelo fabricante. O derivador da rotação gera a aceleração no eixo da TG. O valor é comparado com um limite em pu , passando para um controlador integral. A saída do controlador é a demanda de combustível da malha de controle de aceleração.

Figura 13 - Blocos: Controle de Aceleração



5.4.MALHA DE CONTROLE DE TEMPERATURA

A malha de controle de temperatura, representada pela cor verde na Figura 6, regula a temperatura dos gases na exaustão da TG (TAT) para não ultrapassar o limite definido

pelo fabricante. A temperatura do exaustor é uma variável importante em sistemas de ciclo combinado, pois a HRSG aproveita a energia carregada pelo gás da exaustão. Mantendo a temperatura dos gases da exaustão no valor máximo eleva-se a eficiência do ciclo combinado com HRSG e TV. A malha de controle da TAT/TIT utilizando VIGV atua junto com a malha de controle de temperatura TAT para o funcionamento da TG em ciclo combinado.

5.4.1. Equação f1 – Calculo da Temperatura da TAT

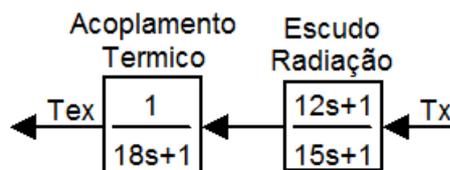
A estrutura da equação f_1 vem do trabalho de ROWEN, 1992. Recebendo a vazão de combustível (W_f), a rotação de rotação da TG (N), a posição do VIGV (IGV) e a vazão de gases na exaustão (W_x) é calculada a temperatura dos gases na exaustão, A equação 2 calcula a temperatura T_x .

$$T_x = \frac{[T_R - 453(N^2 - 4,21N + 4,42) * 0,82(1 - W_F) + 722(1 - N) + 1,92(MaxIGV - IGV)]}{W_x * [1 + 0,0050 * (15 - T_A)]} \quad (2)$$

5.4.2. Dinâmica do Escudo de Radiação e Acoplamento Térmico.

A alta temperatura na exaustão da TG faz preciso utilizar dispositivos de proteção tais como termoposços para os sensores de temperatura. Os efeitos da transferência de calor influenciam na dinâmica de medição de temperatura e são representados por dois blocos, como pode ser visto na Figura 14. A saída desses dois blocos é o sinal de temperatura na exaustão enviado ao sistema controlador.

Figura 14 - Blocos: Escudo de Radiação e Acoplamento Térmico

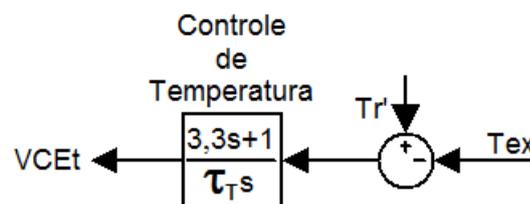


5.4.3. Controlador de Temperatura

O bloco controlador recebe a diferença entre a temperatura de referência (Tr') e a temperatura dos gases na exaustão (Tex), como está representado na Figura 15. O bloco tem como saída a demanda de combustível da malha de controle de temperatura ($VCEt$).

A constante τ_T é a taxa integração do controlador de temperatura.

Figura 15 - Blocos: Controle de Temperatura



5.5.MALHA DE CONTROLE DE TAT/TIT PELA POSIÇÃO DO VIGV

VIGV's (*Variable Inlet Guide Vanes* ou 'palhetas guia de entrada variável' no compressor) são palhetas dos primeiros estágios do compressor axial, que têm a função de controlar a entrada de ar na TG. Mudando o ângulo das palhetas regula-se a vazão de ar de entrada no compressor (PAMPREEN, 1976). Dessa forma é possível mudar a quantidade de ar da mistura na câmara de combustível e controlar a *TAT* mantendo-a no valor máximo, sem alterar a eficiência do ciclo Brayton. Mantendo *TAT* num valor elevado e constante, aumenta-se a eficiência no ciclo combinado (Brayton – Rankine). Quando o controlador regula *TIT* evita que a variável ultrapasse o limite máximo definido pelo fabricante.

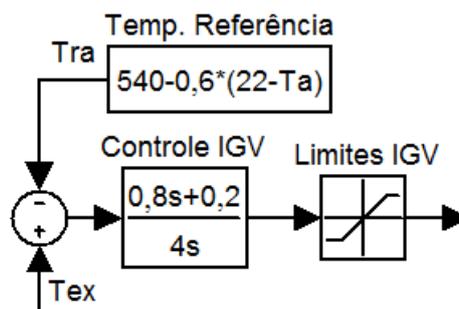
5.5.1. Temperatura de Referência

A temperatura de referência da TG (Figura 16) é a temperatura máxima para os gases na exaustão da TG definida pelo fabricante. Esta referência é corrigida pela temperatura ambiente sendo a base no presente trabalho 22°C. A temperatura de referência é comparada com a temperatura na exaustão (Tex), gerando o erro para o controle do IGV e para o controle de temperatura na exaustão.

5.5.2. Controle do IGV

O bloco de controle do IGV recebe o erro entre a referência e a temperatura do exaustão da TG. A saída é o comando enviado ao IGV. Este comando vai posicionar o IGV em uma faixa de valores angulares que pode variar para cada TG. No modelo de Rowen a faixa varia entre 57° e 84° mecânicos, e de 0,46 até 1 pu. A TG estudada possui uma faixa entre -41° e 5° mecânicos. No modelo foi preciso modificar os blocos de ganho 0,012 e somador 0,94, como pode ser visto na Figura 17. Esses ganhos convertem os valores -41° em 0,46 pu, e 5° em 1 pu. No bloco ‘Limites IGV’ os valores empregados são -41° e 5° . O bloco de controle do IGV está representado na Figura 16.

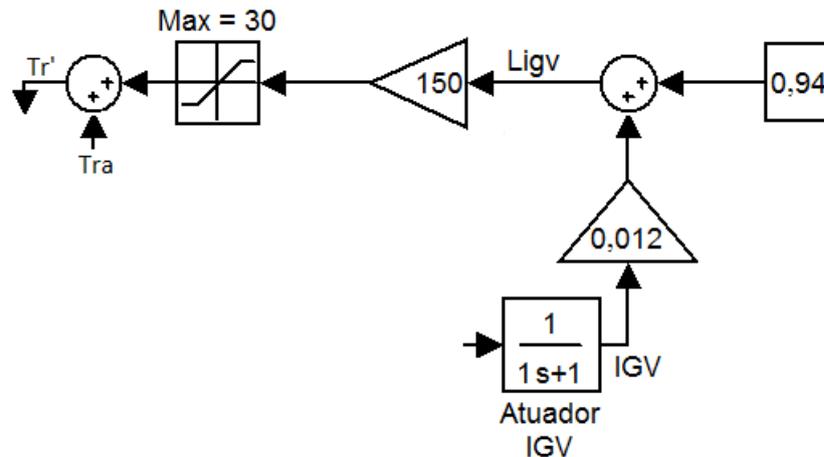
Figura 16 - Blocos: Temperatura de Referência e Controle IGV



5.5.3. Atuador IGV

O atuador do IGV possui uma FT de primeira ordem para representar sua dinâmica. A entrada do bloco é o comando de posição do IGV que vem do controlador e a saída é a posição do IGV. Esse valor é linearizado ficando entre 0,46 e 1 pu. O valor é multiplicado por um ganho de 150 com um limitador e depois somado à temperatura de referência. O motivo disto é para aumentar temporariamente o limite temperatura máxima no exaustor, e permitir a ação transitória do controle de IGV. Esse valor de temperatura de referência corrigida (Tr') é enviado ao controle de temperatura na exaustão.

Figura 17 – Blocos: Atuador IGV e Ajuste na Temperatura de Referência



5.5.4. Equação f₃

A equação f_3 representa a relação entre a posição do IGV na faixa entre 0,46 e 1 pu (L_{igv}), e o fluxo de energia carregada nos gases na exaustão da TG. A equação f_3 pode ser vista na Equação 3.

$$W_x = N * L_{igv}^{0,257} * \frac{519}{T_a + 460} \quad (3)$$

W_x é a vazão de energia carregada no gás na exaustão, N é a rotação da turbina e T_a é a temperatura ambiente.

5.6. RESUMO DE MODIFICAÇÕES DO MODELO DE ROWEN

Utilizando dados amostrados na usina estudada foram calculados e ajustados os valores do modelo. Na Tabela 7 observa-se a diferença entre os valores do modelo de Rowen e os valores calculados para a TG no presente estudo.

Tabela 7 – Valores do Modelo da TG

Descrição	Modelo padrão (ROWEN, 1983) (ROWEN, 1992)	Modelo da TG
Estatismo (Droop)/W	0,04	0,05
K_D	25	20
Y	0,05	0,05
a	1	1
b	0,05 s	0,10 s
c	1	1
τ_f	0,80 s	0,80 s
K_f	0	0
ϵ_{CR}	0,01 s	0,01 s
IGV_{Max}	84°	5°
IGV_{Min}	57°	-41°
ϵ_{TD}	0,04 s	0,04 s
τ_{CD}	0,20 s	0,40 s
τ_T	250°C	250°C
Lim max VCE	1,5 pu	1,5 pu
Lim. min VCE	-0,1 pu	-0,1 pu
Tr	538°C	540°C
τ_l	18,50 s	17,65 s
Ta	15°C	22°C
Aceleração Referência	0,01 pu/s	0,005 pu/s
W_{fmin} (vazio)	0,23 pu	0,2574 pu
Ganhos K_p ; K_i controle de <i>TAT/TIT</i>	0,2 ; 0,05	1 ; 0,25
Cte. Tempo Atuador IGV	3 s	1 s
Cte. Tempo Acoplamento Térmico	2,5 s	18 s
Ganhos K_p ; K_i controle modo Isócrono	750 ; 300	3,5 ; 1,4

6. MODIFICAÇÕES EM RELAÇÃO AO MODELO DE ROWEN (ROWEN, 1992)

O modelo estudado (ROWEN, 1992) foi desenvolvido para alguns modelos de TG da *GE (General Electric)*. Portanto, alguns valores tiveram que ser modificados (Tabela 7) para ajustar o modelo à turbina do presente estudo: ALSTOM modelo GT11N2. Foi necessário também adicionar alguns blocos para representar as peculiaridades da turbina estudada.

6.1. VAZÃO DE COMBUSTÍVEL EM VAZIO

A vazão de combustível em vazio, W_{fmin} , na TG de Rowen era de $0,23 pu$.

Utilizando os dados amostrados e realizando uma aproximação linear para calcular a vazão de combustível em condição de vazio temos:

$$W_{fmin} = 0,2574 pu$$

$$1 - W_{fmin} = 0,7426 pu$$

A equação 4 representa a equação f_2 do modelo implementado.

$$\text{Equação } f_2: \tau_{Turbina} = 1,3466 * (W_f - 0,2574) + 0,5 * (1 - N) \quad (4)$$

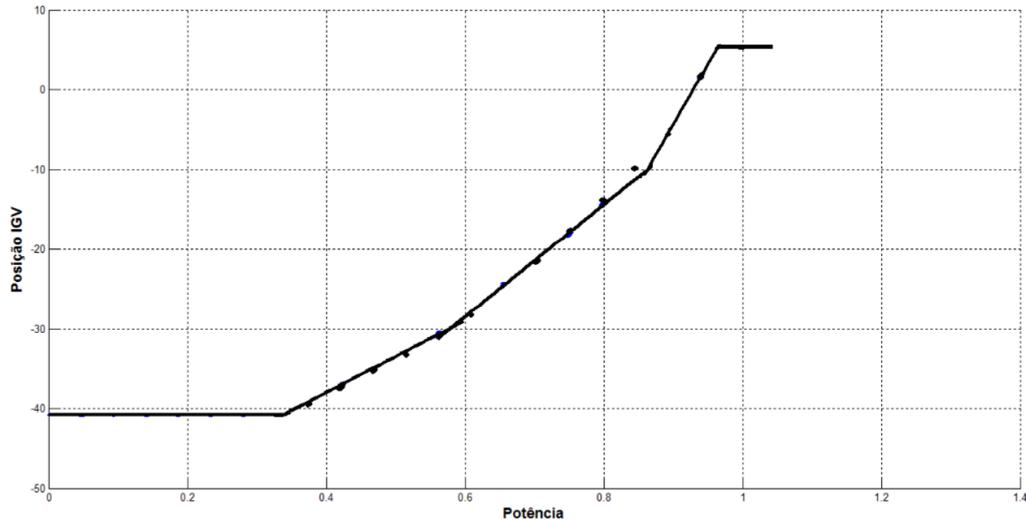
6.2. VARIAÇÃO DA VIGV

O VIGV no modelo padrão (ROWEN, 1992) apresenta um comportamento linear em relação a potência gerada. Já na TG GT11N2 (Figura 20) o comportamento pode ser dividido em cinco partes lineares:

1. Entre 0 e $0,3473 pu$ de Potência: A posição do IGV é fixo em -41° mecânicos.
2. Entre $0,3473$ e $0,5601 pu$ de Potência: Variação linear da Posição do IGV entre -41° e $-29,86^\circ$
3. Entre $0,5601$ e $0,8871 pu$ de Potência: Variação linear da Posição do IGV entre $-29,86^\circ$ e $-10,05^\circ$
4. Entre $0,8871$ e $0,9499 pu$ de Potência: Variação linear da Posição do IGV entre $-10,05^\circ$ e 5° .
5. Acima de $0,9499 pu$ de Potência: A posição do IGV é fixa em 5° .

Para conseguir reproduzir esse comportamento foi necessário adicionar mais um bloco na simulação da turbina a gás. Esse bloco ('Ajuste W_f ' na Figura 19), simula o comportamento não linear do IGV como se observa na Figura 20.

Figura 20 - Gráfico IGV vs. Potência



Esse chaveamento, como descrito a seguir, cria uma vazão de combustível corrigida W_{f1} , que irá para a equação f_1 . Como a potência varia de 0 a $1pu$ e a vazão de combustível de 0.2574 e $1pu$ foi necessário transformar as faixas de potência para ajustá-las com a variação na vazão de combustível W_f . Essa implementação pode ser vista nas equações de 5 a 8 e na Figura 21.

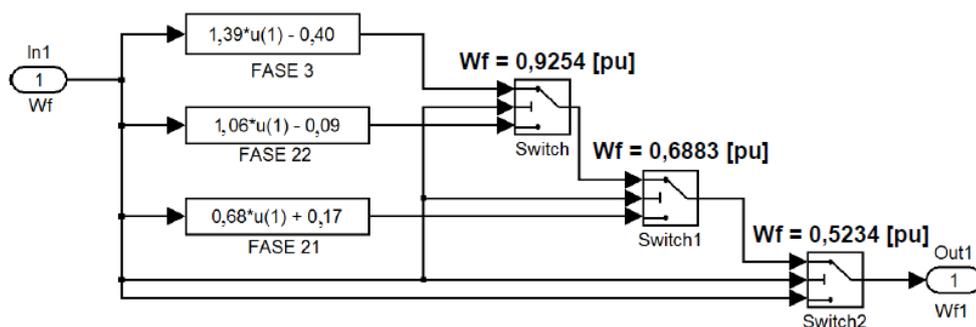
$$W_f \text{ menor que } 0,5234 \text{ pu} : W_{f1} = W_f \quad (5)$$

$$W_f \text{ entre } 0,5234 \text{ e } 0,6883 \text{ pu do Fluxo: } W_{f1} = 0,68 * W_f + 0,17 \quad (6)$$

$$W_f \text{ entre } 0,6883 \text{ e } 0,9254 \text{ pu do Fluxo: } W_{f1} = 1,06 * W_f - 0,09 \quad (7)$$

$$W_f \text{ acima de } 0,9254 \text{ pu do Fluxo: } W_{f1} = 1,39 * W_f - 0,40 \quad (8)$$

Figura 21 - Ajuste da relação não-linear entre W_f e IGV



6.3.EQUAÇÃO f_1

A equação f_1 teve que ser modificada com os valores calculados utilizando dados amostrados da TG GT11N2. Dessa forma a equação 9 ficou da seguinte forma:

$$T_x = \frac{[540 - 453(N^2 - 4,21N + 4,42) * 0,78(1 - W_{f1}) + 722(1 - N) + 0,047(5 - IGV)]}{W_x * [1 + 0,005 * (22 - T_A)]} \quad (9)$$

6.4.EQUAÇÃO f_3

A equação f_3 foi modificada com os valores calculados com dados amostrados na TG estudada. Na equação 10 observa-se a equação implementada.

$$W_x = Ligt^{0,605} \left(\frac{295,15}{T_a + 273,15} \right) \quad (10)$$

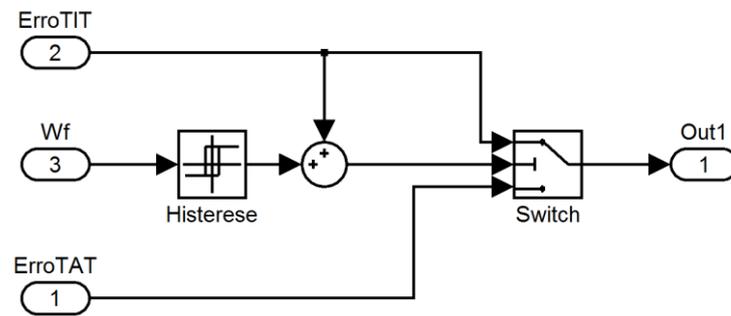
6.5.MUDANÇA NO CONTROLE DE IGV

No estudo realizado foi constatado que o controle no posicionamento do IGV age sobre duas variáveis: TAT e TIT . O controle na temperatura dos gases na exaustão (TAT) opera desde operação em vazio até a vazão de combustível (W_f) atingir $0,9254pu$. Acima desse valor ocorre o chaveamento do controle para a temperatura de entrada no primeiro estágio turbina (TIT). No bloco “Chave TIT” da Figura 18 estão contidos os blocos de chaveamento apresentados na Figura 22. Dado o elevado valor na temperatura TIT não é possível medi-lo diretamente e a variável é calculada pelo sistema da TG. Utilizando dados amostrados foi calculada a equação 11.

$$TIT = 1,164 * TAT + 270,6 * W_f + 190 \quad (11)$$

Para evitar instabilidades na faixa próxima no chaveamento entre as variáveis controladas (TAT/TIT) foi definida uma histerese. Os limites calculados para a histerese foram $0,9pu$ e $0,925pu$.

Figura 22 - Modelo de Chaveamento no Controle de IGV



7. SIMULAÇÃO DO MODELO DA TURBINA A GÁS

O modelo calculado foi implementado em MatLab/Simulink e comparado com dados reais amostrados na máquina estudada. Dentre os dados disponíveis foram escolhidos quatro dias de operação onde aconteceram variações transitórias na potência sendo gerada. Foram utilizados valores das duas TG do primeiro bloco da usina estudada, chamadas TG11 e a TG12 da usina TermoRio. O tempo de amostragem dos dados fornecidos foi de 1 segundo.

O Processo de validação utilizado no presente trabalho foi a raiz do erro quadrático médio normalizado, demonstrada nas equações 12 a 14.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^N (x - x_{ref})^2}{N}} \quad (12)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{ref,max} - X_{ref,min}} \quad (13)$$

$$Val = (1 - NRMSE) * 100 \quad (14)$$

Onde x são os dados simulados pelo modelo em Simulink, x_{ref} são os dados amostrados enviados pela Petrobras e N representa a quantidade de amostras. A Tabela 8 apresenta as datas e horários em que os dados foram amostrados.

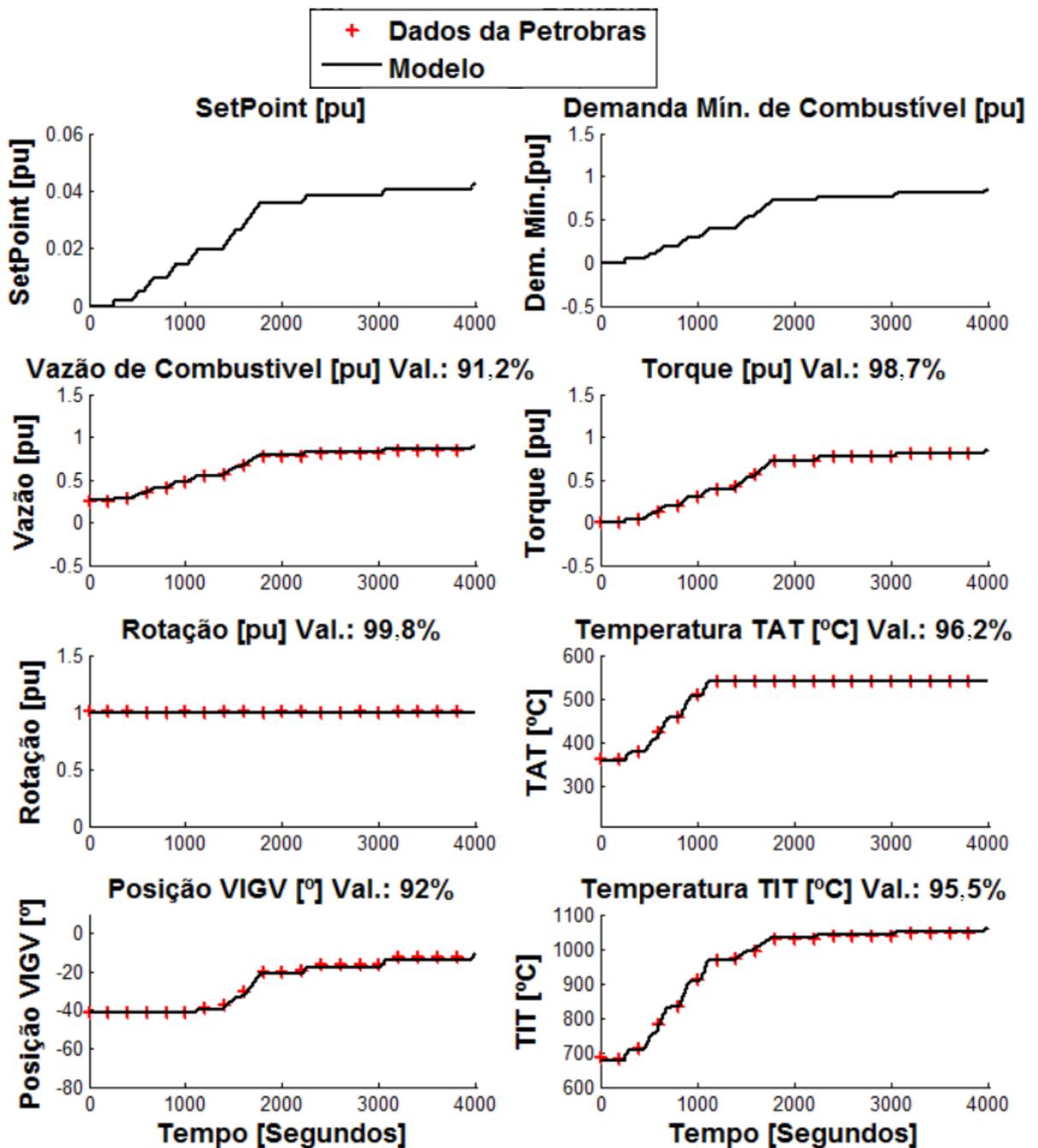
Tabela 8 - Relação de Casos de Simulação - TG

Caso	Data	Turbina	Início	Fim
Caso 1	21/03/2013	TG12	02:33:17	03:39:59
Caso 2	30/04/2014	TG11	04:16:37	05:23:17
Caso 3	22/07/2013	TG11	04:06:37	06:53:17
Caso 4	21/03/2013	TG11	02:00:00	05:59:59

7.1.CASO 1

O caso 1 ocorreu no dia 21 de março de 2013, na turbina TG12. Os dados foram recolhidos entre 02:33:17 e 03:39:59. Os resultados gráficos são apresentados na Figura 23. Os valores de validação foram: Vazão de combustível 91,2%, Torque 98,7%, Rotação 99,8%, TAT 96,2%, IGV 92% e TIT 95,5%.

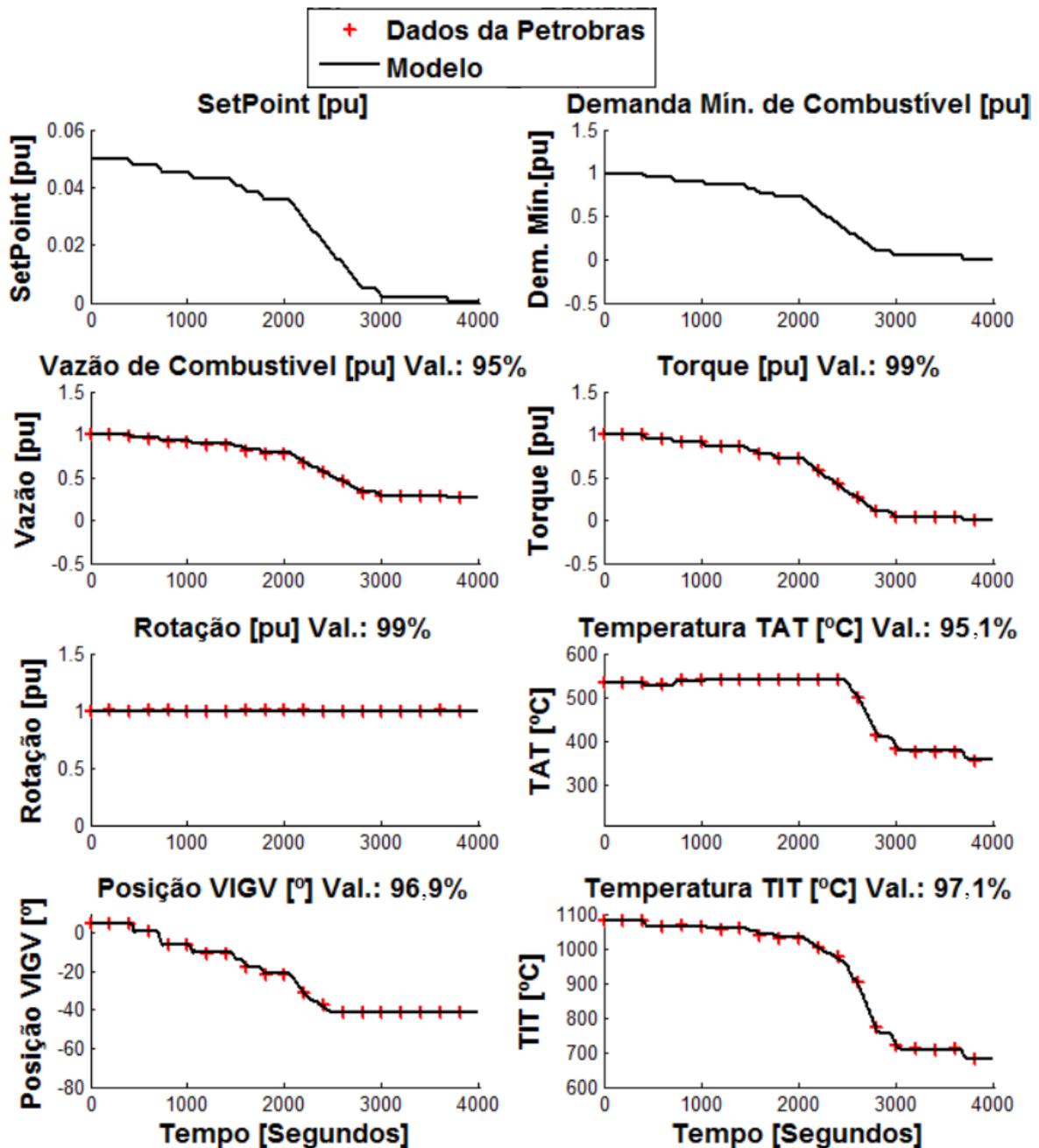
Figura 23 - Caso 1



7.2.CASO 2

O caso 2 ocorreu no dia 30 de abril de 2014, na turbina TG11. Os dados foram recolhidos entre 04:16:37 e 05:23:17. Os resultados podem ser vistos na Figura 24. Os valores de validação foram: Vazão de combustível 95%, Torque 99%, rotação 99%, TAT 95,1%, IGV 96,9% e TIT 97,1%.

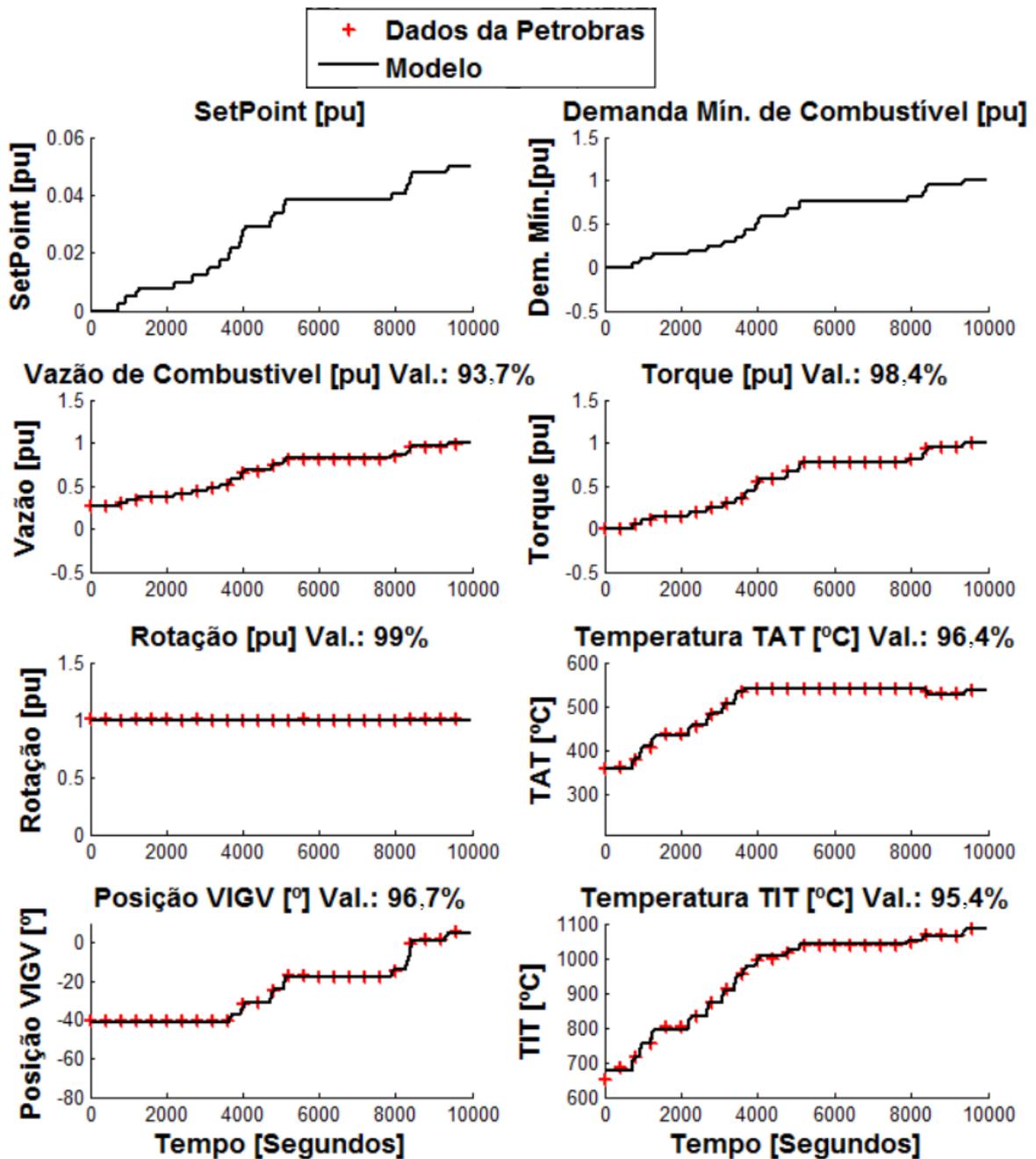
Figura 24 - Caso 2



7.3.CASO 3

O caso 3 ocorreu no dia 22 de julho de 2013, na turbina TG11. Os dados foram recolhidos entre 04:06:37 e 06:53:17. Os resultados podem ser vistos na Figura 25. Os valores de validação foram: Vazão de combustível 93,7%, Torque 98,4%, rotação 99%, TAT 96,4%, IGV 96,7% e TIT 95,4%.

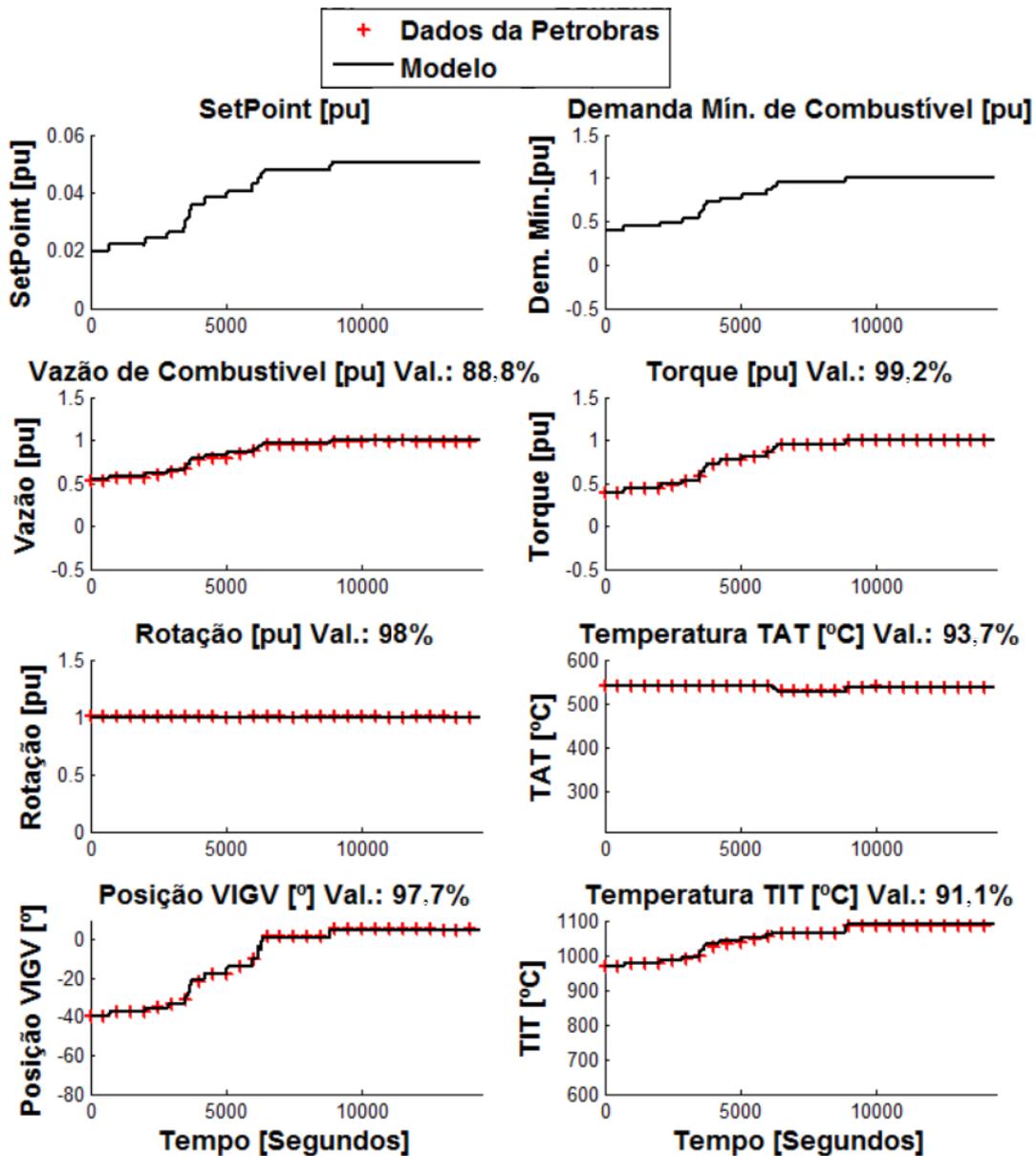
Figura 25 – Caso 3



7.4.CASO 4

O caso 4 ocorreu no dia 21 de março de 2013, na turbina TG11. Os dados foram recolhidos entre 02:00:00 e 05:59:59. Os resultados podem ser vistos na Figura 26. Os valores de validação foram: Vazão de combustível 88,8%, Torque 99,2%, rotação 98%, *TAT* 93,7%, *IGV* 97,7% e *TIT* 91,1%. Os erros parecem maiores em relação aos outros casos de simulação, mas isso ocorre por causa da região de variação de carga, de 40% a 100%, que é menor que a variação dos outros dias. Dessa forma o NRMSE tem denominador menor, o que gera esse erro maior.

Figura 26 - Caso 4



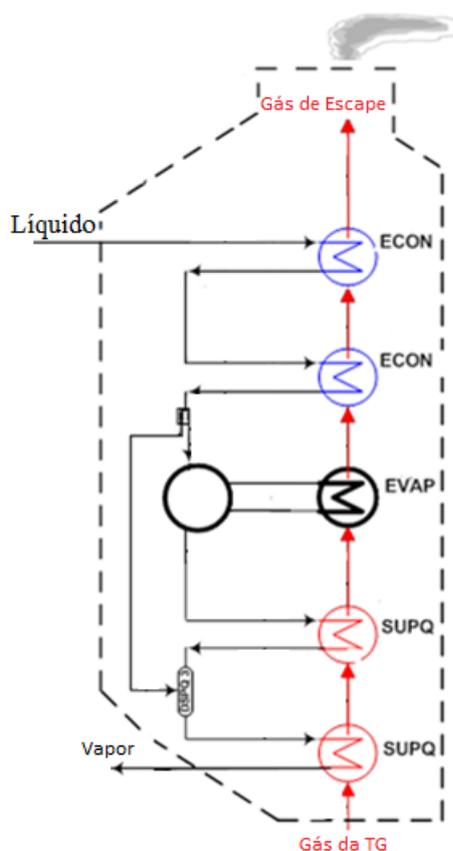
8. HRSG E TURBINA A VAPOR

As usinas térmicas em ciclo combinado incorporam um segundo ciclo gerador de energia, aproveitando a energia residual do primeiro ciclo. No caso da planta em estudo isto é conseguido através de uma caldeira de recuperação de vapor capaz de recuperar parte do calor carregado nos gases na exaustão das TG (DE OLIVEIRA JÚNIOR, 2009). Este gerador de vapor, ou caldeira, é normalmente conhecido pela sigla HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*).

A HRSG possui como principais equipamentos: superaquecedor, evaporador e economizador.

Na Figura 27 observa-se o esquema da HRSG.

Figura 27 - Esquema da HRSG



O economizador também é um trocador de calor que tem como função aquecer a água na fase líquida comprimindo mediante a utilização da energia absorvida (no caso da HRSG) dos gases quentes da exaustão da TG, sendo que não há mudança de fase da água nesse momento (DE OLIVEIRA JÚNIOR, 2009). A entrada do economizador pode estar conectada a um outro economizador ou a uma bomba de alimentação. A saída do economizador pode ser conectada a um evaporador ou a outro economizador.

O evaporador também é um trocador de calor. Sua principal função é a mudança de fase da água do estado de líquido saturado para o estado de vapor saturado (DE OLIVEIRA JÚNIOR, 2009). O evaporador fornece vapor saturado para um superaquecedor e recebe líquido saturado de um economizador. É no evaporador onde é efetivamente estabelecida a vazão de vapor que irá gerar potência na TV.

O superaquecedor é um trocador de calor. Sua função é elevar a temperatura do vapor gerando vapor superaquecido através da extração da energia de uma fonte térmica (na usina estudada a energia vem dos gases na exaustão da TG). O vapor de entrada é vapor saturado proveniente de um evaporador ou de qualquer outra linha, como de extração da TV, e o mesmo é superaquecido até uma temperatura acima da temperatura de saturação (DA SILVA, 2004). O superaquecedor pode também ser empregado para elevar ainda mais a temperatura do vapor superaquecido proveniente de outro superaquecedor.

O terceiro elemento de uma usina em ciclo combinado é a TV, cuja função é gerar energia elétrica adicional a partir do vapor produzido na HRSG. Após ter entregue a sua energia, o vapor que sai da TV é condensado e volta a ser usado como água de alimentação da HRSG. Dessa forma a energia térmica dos gases exaustos da TG é utilizada para transformar a água em vapor no ciclo da HRSG, gerando energia adicional no vapor enviado à TV, aumentando a eficiência do ciclo global da que é obtida funcionando de forma individual. (KEHLHOFER, RUKES , *et al.*, 2009)

9. MODELAGEM DA HRSG E DA TURBINA A VAPOR

O modelo da HRSG e da TV é dividido em três partes principais:

1. Modelo da HRSG
2. Controle da válvula de vapor da TV.
3. Modelo da Produção de Potência pelos estágios da TV.

Os modelos completos podem ser vistos na Figura 40 e Figura 41.

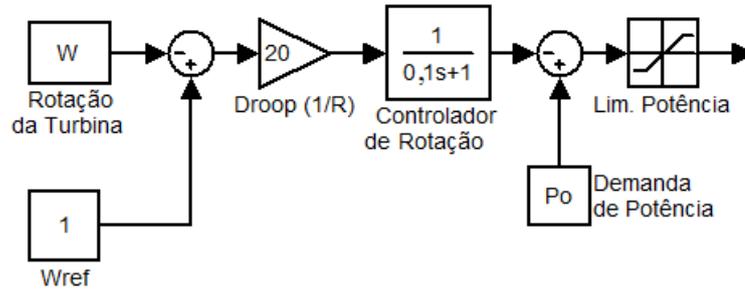
9.1. CONTROLE DA VÁLVULA DE VAPOR DA TURBINA A VAPOR.

A primeira parte do controle da TV recebe como entrada a rotação da TV e a potência exigida pela TV. A saída desse modelo é a posição da válvula de passagem de vapor da HRSG para a TV. (WORKING GROUP ON PRIME MOVER AND ENERGY SUPPLY MODELS FOR SYSTEM DYNAMIC PERFORMANCE STUDIES, 1991).

9.1.1. Controle de Rotação e Potência

A variável controlada no modelo da TV é a rotação. Esse valor é comparado com a rotação de referência da TV, no caso $1pu$. Esse erro é multiplicado pela constante de *Droop*, que representa $1/K_D$, sendo igual a 20 para Droop de 5%, de forma similar ao modelo da TG, além de uma FT de primeira ordem do controlador de rotação, que tem como saída a potência produzida pela rotação, que é comparada com a potência exigida pela rede. Na Figura 38 observa-se a representação do controle de rotação e Potência da TV. Esse erro de potência é limitado para condições de funcionamento, no modelo apresentado o valor ficou entre 0 e $1,1pu$. Esse valor é enviado como comando para o sistema válvula de cross-over, que controla a vazão de vapor para a TV.

Figura 28 - Blocos: Controle de Rotação e Potência - TV



9.1.2. Primeira e Segunda Válvulas e Controle Da Posição

O sistema de válvulas de controle de vazão do vapor possui duas dinâmicas não lineares que se compensam para produzir um funcionamento aproximadamente linear como é mostrado na Figura 29 com o funcionamento mecânico e na Figura 30 com o diagrama de blocos.

A primeira é a relação entre o comando e o posicionador da válvula de cross-over. A segunda é a relação entre a posição da válvula e a vazão efetiva de vapor passando através dela. Isto é apresentado na Figura 30 e Figura 31. O comportamento desses dispositivos é reproduzido no modelo nas Funções f_1 -ST e f_2 -ST da Figura 31.

Figura 29 - Funcionamento Mecânico Válvula de Vapor à TV

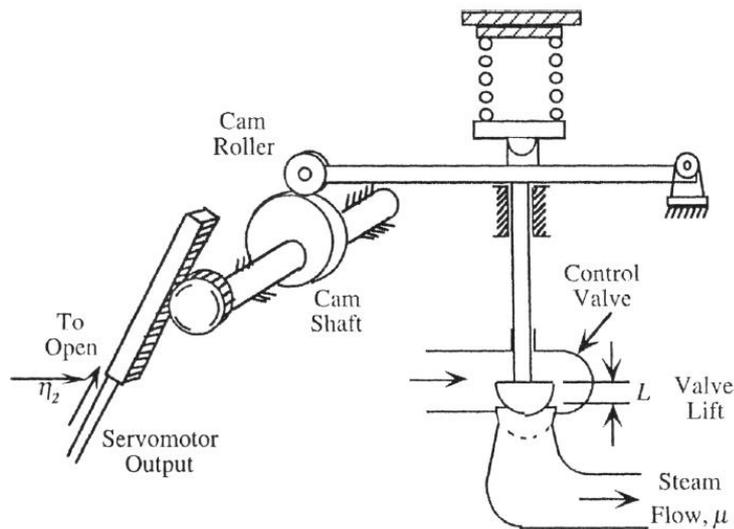


Figura 30 - Representação de Diagramas de Blocos - Válvula

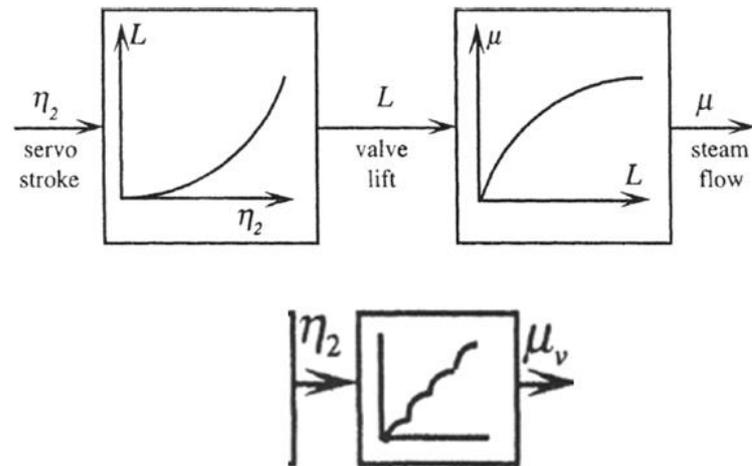
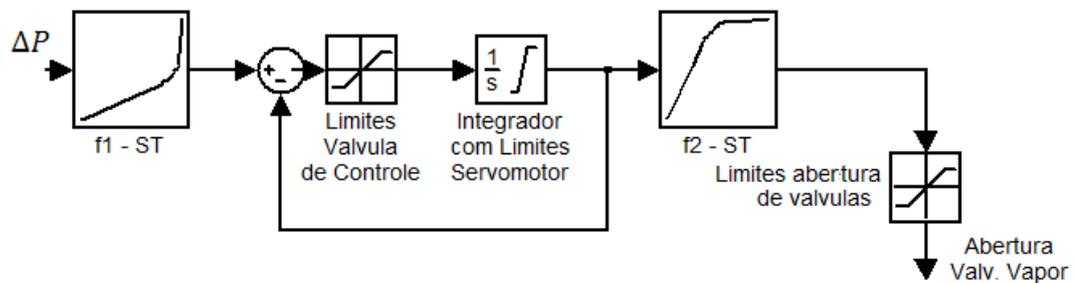


Figura 31 - Blocos: f1 e f2 da TV



A relação não-linear no primeiro dispositivo é representada por uma tabela de valores que foram interpolados no modelo para representar essa relação (Tabela 9).

Tabela 9 - Valores de Interpolação do Posicionador da Válvula de Cross-Over

ΔP [pu]	ValCo [pu]	ΔP [pu]	ValCo [pu]
0	0	0,9240	0,4670
0,0130	0,0100	0,9310	0,4780
0,5520	0,2610	0,9380	0,4890
0,7700	0,3480	0,9440	0,500
0,7920	0,3590	0,9500	0,5100
0,8120	0,3700	0,9590	0,5300
0,8290	0,3810	0,9670	0,5500
0,8450	0,3920	0,9730	0,5700
0,8600	0,4020	0,9800	0,600
0,8850	0,4240	0,9880	0,6500
0,9060	0,4460	1	1

O comando enviado à válvula passa por um controle malha fechada local. A Tabela 10 mostra os valores de interpolação no segundo dispositivo que foram utilizados no presente modelo.

Tabela 10 - Valores de Interpolação da Relação entre a Posição da Válvula e a vazão de Vapor

<i>ValCo' [pu]</i>	<i>ValvPos [pu]</i>	<i>ValCo' [pu]</i>	<i>ValvPos [pu]</i>
0	0	0,4670	0,9240
0,0100	0,0130	0,4780	0,9310
0,2610	0,5520	0,4890	0,9380
0,3480	0,7700	0,500	0,9440
0,3590	0,7920	0,5100	0,9500
0,3700	0,8120	0,5300	0,9590
0,3810	0,8290	0,5500	0,9670
0,3920	0,8450	0,5700	0,9730
0,4020	0,8600	0,600	0,9800
0,4240	0,8850	0,6500	0,9880
0,4460	0,9060	1	1

Dessa forma a saída dessa malha de controle é a vazão de energia carregada pelo vapor circulando através da válvula de cross-over.

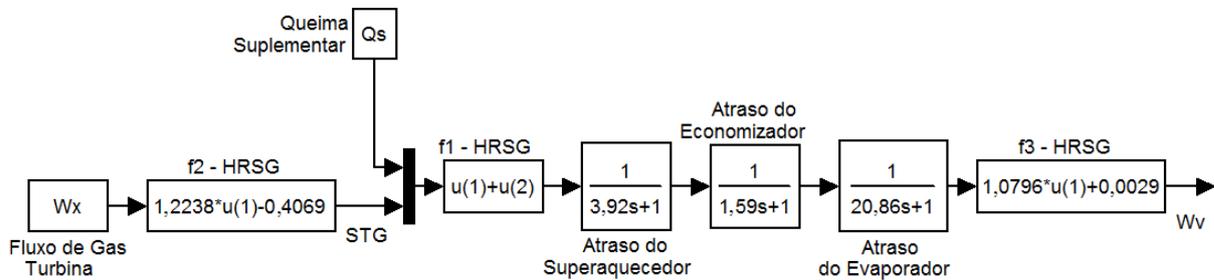
9.2.HRSG

Na Figura 32 temos a representação do modelo da HRSG. A entrada na HRSG é a energia contida nos gases da exaustão da TG, junto com a energia adicional da queima suplementar. A soma desses dois sinais passa por três FT de primeira ordem que representam os atrasos pela transferência de calor ao economizador, ao superaquecedor e ao evaporador.

A saída do terceiro bloco é a vazão de vapor na saída da HRSG expresso em *pu*, que é corrigida pela equação f_3 -HRSG. Essa vazão é multiplicada pelo fator de participação de cada caldeira, sendo que a soma dos fatores deve ser igual a 1. Como se trata de duas HRSG das mesmas características, cada uma alimentada por uma TG, o fator de participação

usado no presente trabalho é 0,5. As vazões de vapor das HRSG são somadas e esse sinal vai para o bloco que representa a válvula de cross-over da TV.

Figura 32 - Modelo da HRSG



Para conseguir validar as constantes de tempo no modelo da HRSG são necessários dados reais amostrados sob condições de variação de carga para gerar uma resposta transitória tanto nas TG que geram o gás de exaustão quanto nas HRSG e TV. Tais dados devem ter um tempo de amostragem apropriado e as máquinas devem estar próximas das condições térmicas nominais de operação. Como não foi possível contar com tais dados foram utilizados dados gerados por modelos térmicos (MARCATO, NOVGORODCEV JUNIOR, *et al.*, 2015) para a TG, HRSG e TV.

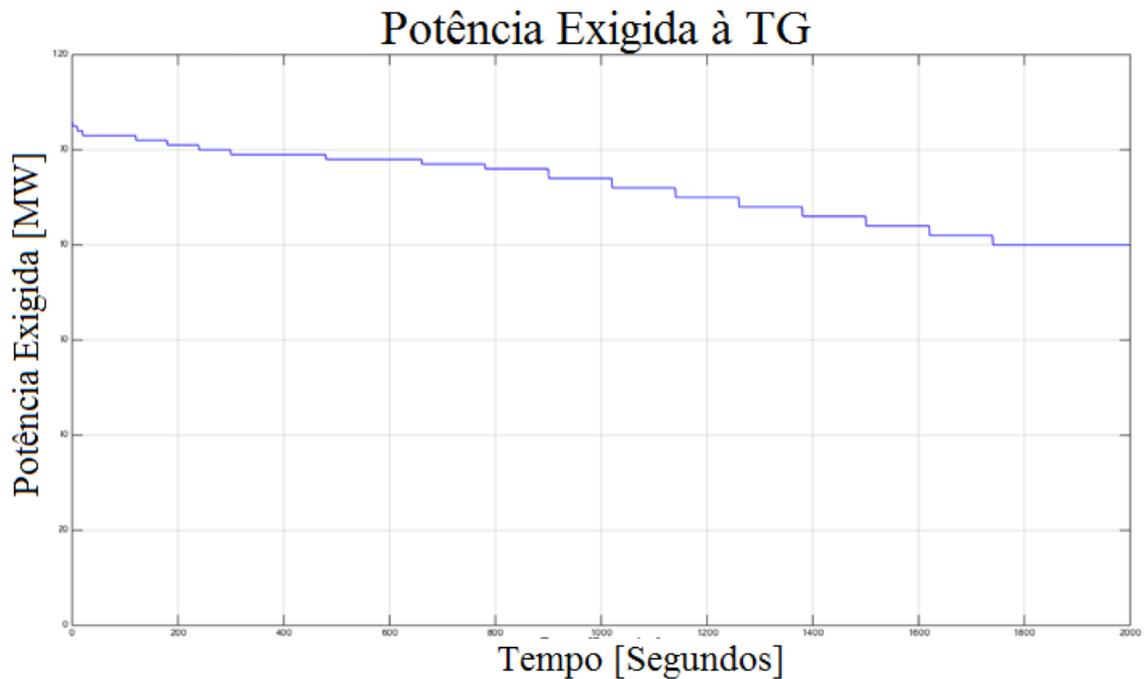
Os dados simulados pelos modelos térmicos foram utilizados para calcular as constantes de tempo dos três blocos de atraso FT da caldeira. Para isso foram utilizados algoritmos numéricos para calcular modelos dinâmicos lineares de tipo: ARX, ARMAX, Box Jenkins (BJ) e Output Error (OE). Também foram testados vários algoritmos de cálculo: mínimos quadrados (MQ), mínimos quadrados com funções de correlação (MQ com FC) e mínimos quadrados com variável instrumental (MQ com IV) (AGUIRRE, 2004).

9.2.1. Simulação no modelo térmico da TG no Modelo Térmico

A simulação no modelo térmico da TG foi realizada em modo “isócrono” com a TG alimentando uma carga local em operação ilhada. No controle de rotação foi utilizado um controle PI com ganho proporcional $K_p=12,55$ e ganho integral $K_i=3,14$. No controle de TAT/TIT foi também utilizado um controle PI com $K_p=0,013$ e $K_i=0,013$. O tempo de amostragem na simulação do modelo térmico foi de 1 segundo.

Na Figura 33 apresenta os valores da potência gerada pelo modelo em MW, começando em plena carga (106,1MW) e diminuindo com degraus negativos de 2MW.

Figura 33 - Potência simulada no modelo térmico da TG



Dessa forma na Figura 34 temos a vazão mássica de gás na exaustão da TG no modelo DESTUR (MARCATO, NOVGORODCEV JUNIOR, *et al.*, 2015), enquanto na Figura 35, Figura 36 e na Figura 37 temos a entrada e saída nos blocos de Atraso do Superaquecedor, Atraso do Economizador e Atraso do Evaporador, respectivamente. Estes valores foram utilizados para validação dos blocos.

Figura 34 - Vazão de gás de exaustão saída da TG modelo DESTUR

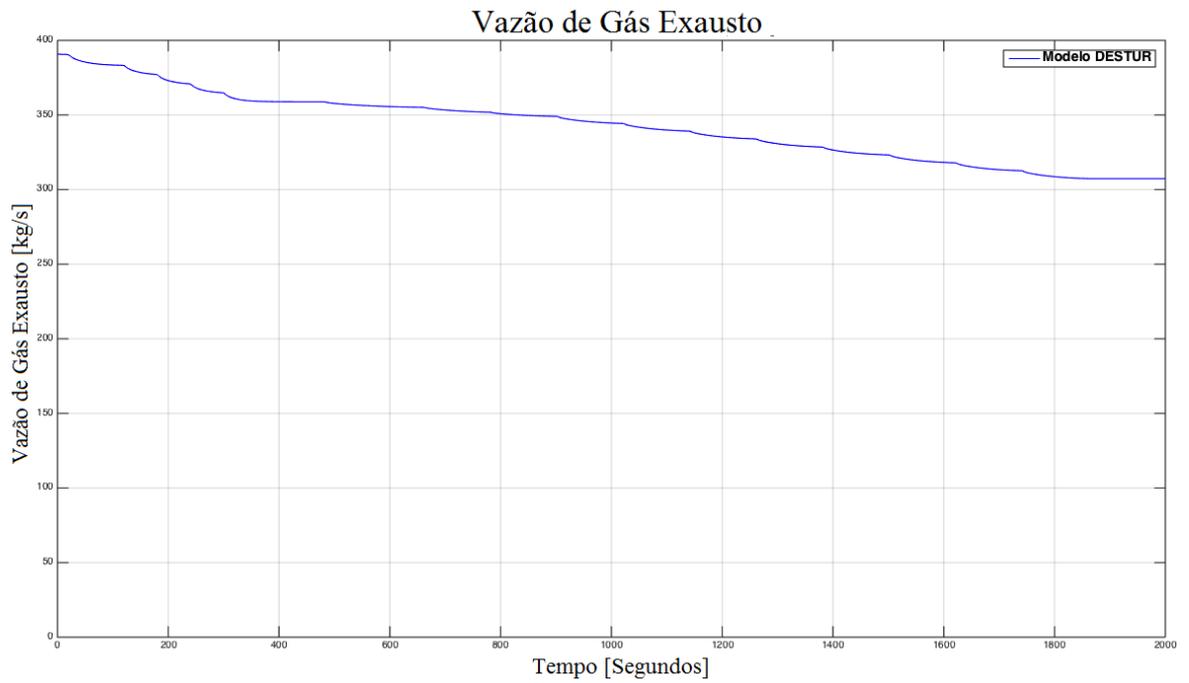


Figura 35 - Fluxo de energia E/S bloco “Atraso do Superaquecedor”

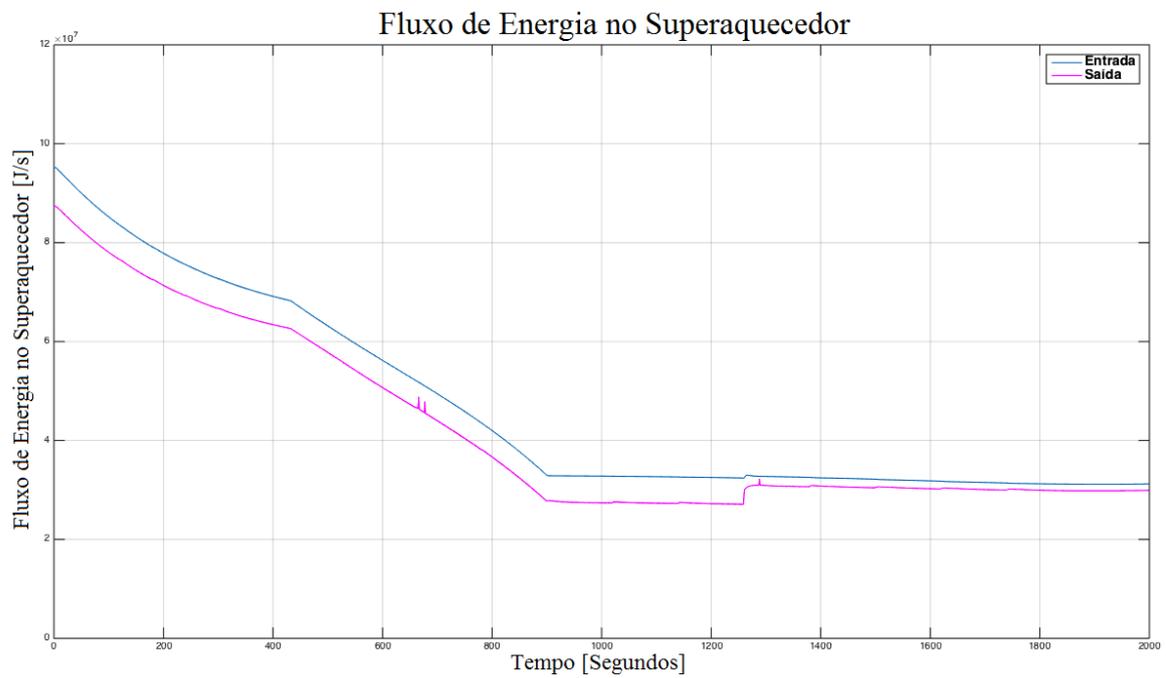


Figura 36 - Fluxo de energia E/S bloco “Atraso do Economizador”

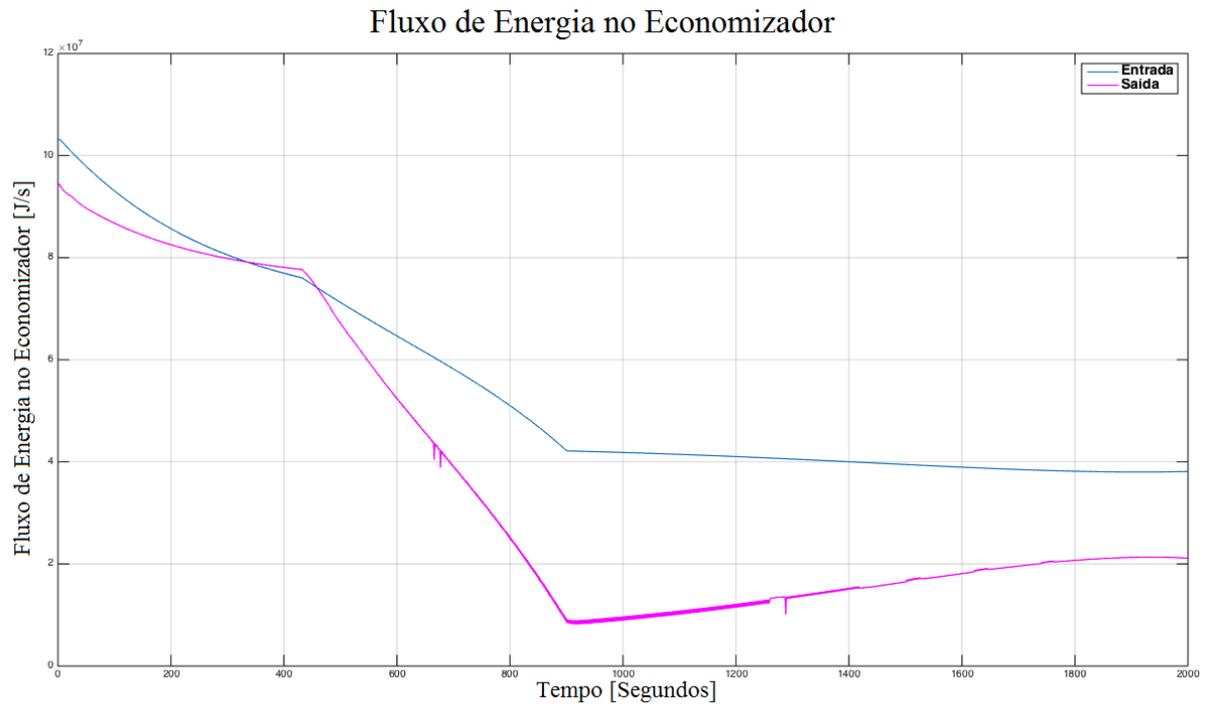
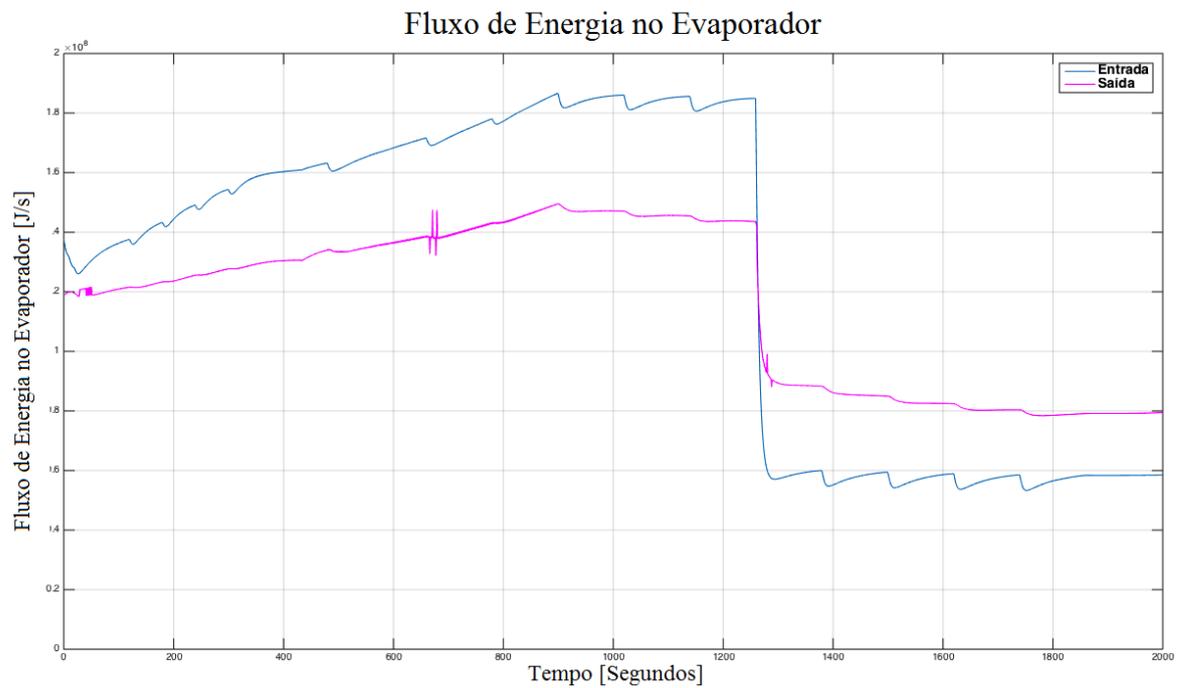


Figura 37 - Fluxo de energia E/S bloco “Atraso do Evaporador”



9.2.2. Equação f1, f2 e f3 da HRSG

A energia térmica proveniente da TG não é a única fonte para a HRSG. A caldeira possui um sistema de queima de combustível complementar, antes do superaquecedor, para aumentar a produção de vapor da TV caso necessário.

A vazão de combustível que é enviado para a queima suplementar é proporcional com a necessidade de produção de vapor.

Para definir os valores do modelo em pu é preciso definir os valores base das variáveis no modelo, que podem ser observadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores Base utilizados neste trabalho - modelo HRSG na TV

Variável	Descrição	Valor Base	Unidade
W_x	Vazão de gás de exaustão na saída da TG	365,96	MJ/s
		393,07	kg/s
		1	<i>pu</i>
STG	Vazão de energia entregue pelo W_x à caldeira	186,83	MJ/s
		0,827	<i>pu</i>
W_{QS}	Vazão de GN/energia nominal queima suplementar (com 0,90 de eficiência)	11500	m ³ /h
		104,35	MJ/s
		0,462	<i>pu</i>
W_v	Vazão de vapor/energia nominal para uma HRSG	320,22	Ton/h
		312,18	MJ/s
		1,382	<i>pu</i>
W_{vt}	Vazão de vapor/energia total nominal em ambas HRSGs	640,44	Ton/h
		624,36	MJ/s
		1	<i>pu</i>
W_t	Vazão de vapor/energia entrando na TV	640,44	Ton/h
		624,36	MJ/s
		1	<i>pu</i>
W_{ext}	Vazão de vapor/energia extraído para a REDUC	198,36	Ton/h
		178,96	MJ/s
		0,286	<i>pu</i>
P_{mec}	Potência nominal na TV	169,9	MW
		0,752	<i>pu</i>
W	Rotação nominal na TV	3600	RPM
		1	<i>pu</i>

Ao definir as bases a equação f_1 -HRSG foi ajustada

$$f_1 - HRSG: W_v = STG + W_{QS} \quad (15)$$

Foram criadas duas novas equações algébricas para transformar W_x , fluxo de energia proveniente dos gases na exaustão da TG, em STG , que é o fluxo de energia de entrada da HRSG e para ajustar a variável W_v para sua respectiva base:

$$f_2 - HRSG: STG = 1,2238 * W_x - 0,4069 \quad (16)$$

$$f_3 - HRSG: W_v = 1,0796 * u + 0,0029 \quad (17)$$

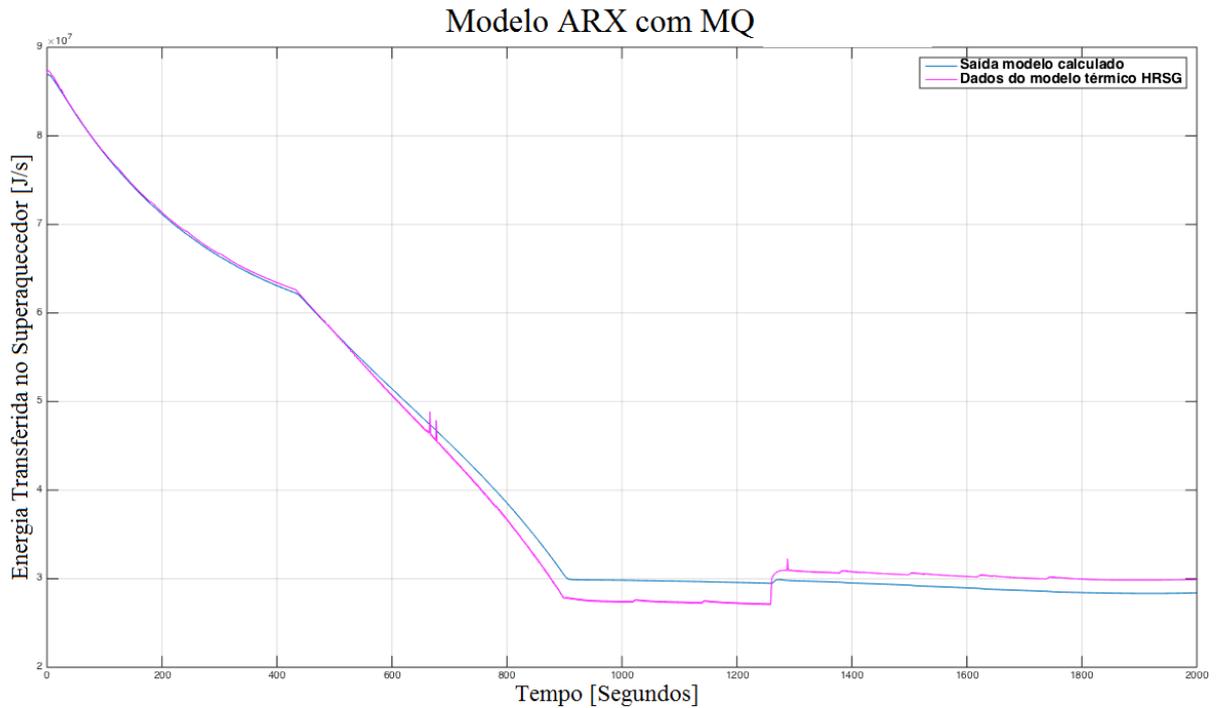
9.2.3. Superaquecedor

Utilizando os dados obtidos nos modelos térmicos da TG e HRSG foi calculada a FT no bloco “Atraso do Superaquecedor”. Várias estruturas e algoritmos de modelo dinâmico linear foram testadas, e a melhor validação foi obtida com a estrutura ARX e o algoritmo MQ com FC. O resultado FT está abaixo, como mostrado na Figura 22.

$$\frac{1}{3,92 s + 1}$$

A linha em cor magenta corresponde aos dados do modelo térmico HRSG, a linha em cor azul corresponde à saída simulada do modelo dinâmico calculado.

Figura 38 – Comparação sinais modelo térmico e dinâmico bloco ‘Atraso do Superaquecedor’



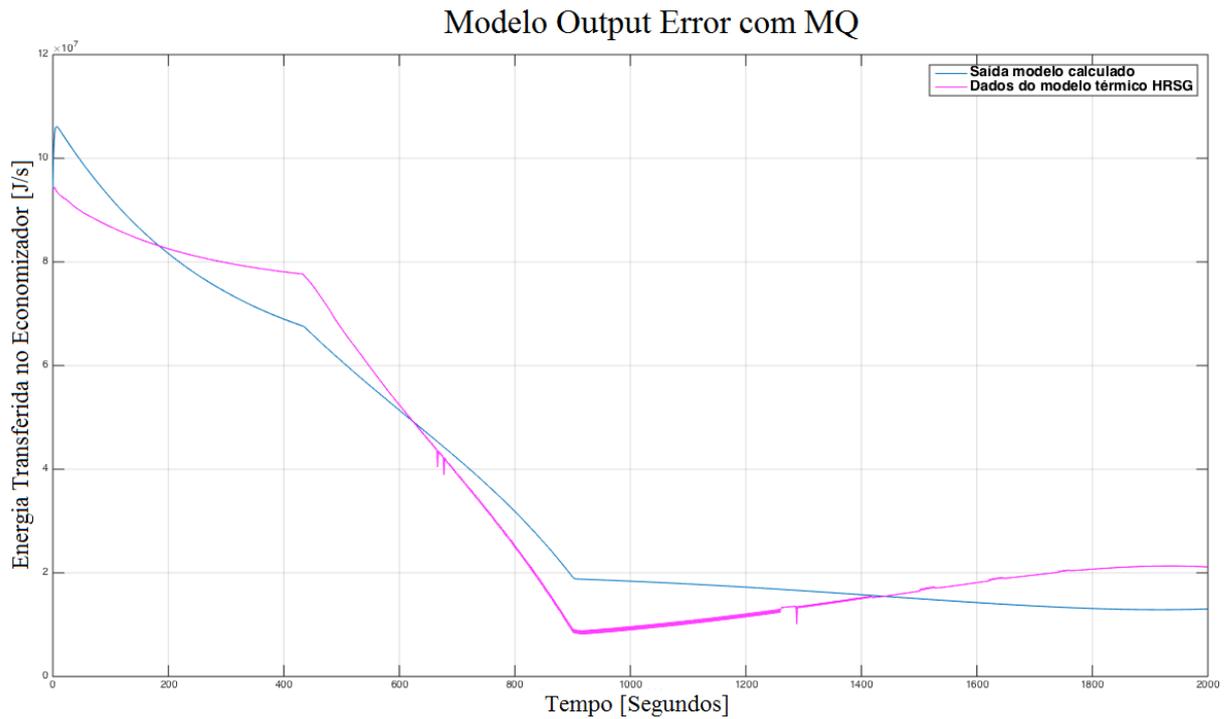
9.2.4. Economizador

No bloco “Atraso do Economizador a melhor validação foi obtida com a estrutura OE e algoritmo MQ. A FT calculada é apresentada a seguir, como mostrado na Figura 23

$$\frac{1}{1,59 s + 1}$$

A linha em magenta corresponde aos dados de saída do modelo térmico, a linha em azul à saída do modelo calculado

Figura 39 - Comparação sinais modelo térmico e dinâmico bloco ‘Atraso do Economizador’



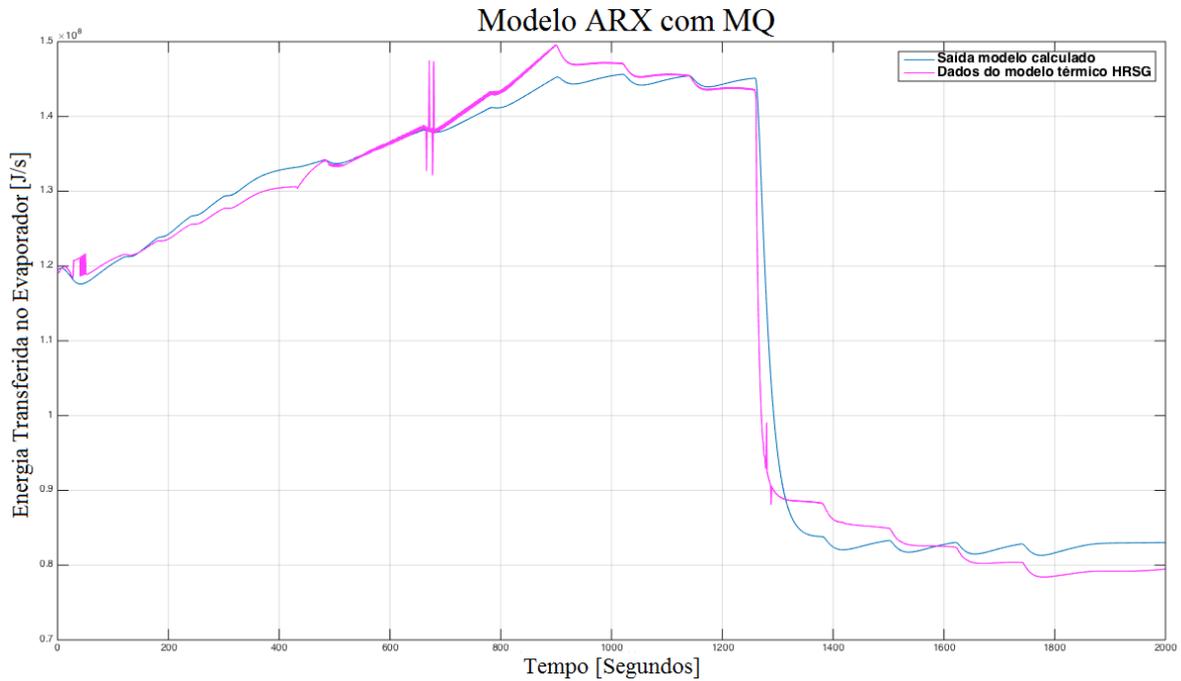
9.2.5. Evaporador

No bloco “Atraso do Evaporador” melhor validação foi obtida com estrutura ARX e o algoritmo MQ com FQ. A FT calculada é apresentada embaixo, como mostrado na Figura 24

$$\frac{1}{20,86 s + 1}$$

A linha em magenta corresponde aos dados de saída do modelo térmico, a linha em azul à saída do modelo calculado

Figura 24 - Comparação sinais modelo térmico e dinâmico bloco ‘Atraso do Evaporador’



9.3. MODELO DA PRODUÇÃO DE POTÊNCIA PELOS ESTADOS DA TV.

9.3.1. Atraso de Transporte

O fluxo de energia do vapor na HRSG passa por uma FT de primeira ordem em seu deslocamento para a TV. O bloco “Atraso de Transporte de Vapor” representa essa dinâmica. A constante de tempo T_{CH} utilizada no presente trabalho é 0.25 segundos.

9.3.2. Crossover Piping

No estágio de baixa pressão da TV ocorre o atraso pelo deslocamento do vapor nas tubulações de baixa pressão, conhecidas como ‘*Crossover Piping*’. O bloco “Atraso de Crossover Piping” representa essa dinâmica. A constante de tempo T_{CO} que melhor representa é 0.20 segundos

9.3.3. Fatores de Potência

No modelo apresentado para TV cada estágio (Alta pressão, média pressão e baixa pressão) tem seus fatores de participação na produção de energia da TV. Para o cálculo de cada fator de participação foi levantada a potência mecânica total produzida pela TV e a diferença de entalpia (em J/s) de cada estágio.

Deste modo foi possível obter a Tabela 12.

Tabela 12 - Entalpia de cada Estagio

Fator de Participação	Valor
Alta Pressão (F_{HP})	0,208
Média Pressão (F_{IP})	0,377
Baixa Pressão (F_{LP})	0,415
Vapor de Extração (F_{EX})	1

9.3.4. Extração

A TV tem em seus estágios de média e baixa pressão a possibilidade de extração de vapor para fins industriais. Essa extração é realizada pela refinaria de Duque de Caxias, REDUC, e é prioritária para a TV. Dessa forma é modelada por uma FT de primeira ordem da extração, representada pelo bloco “Atraso de Extração”, além do ganho da Extração, que representa a energia extraída pela REDUC em relação a produzida nos dois pontos.

$$F_{EX} = 1$$

9.3.5. Potência Total

A soma dos sinais dos três estados da TV, alta pressão, media pressão e baixa pressão, multiplicados pelo fator de participação de cada estágio, é a potência gerada pela máquina em pu . Esse sinal é multiplicado por um ganho que representa a eficiência do gerador elétrico, e cuja saída é a potência elétrica gerada em PU

Figura 40 - Modelo do Controle de Válvula de Vapor e HRSG

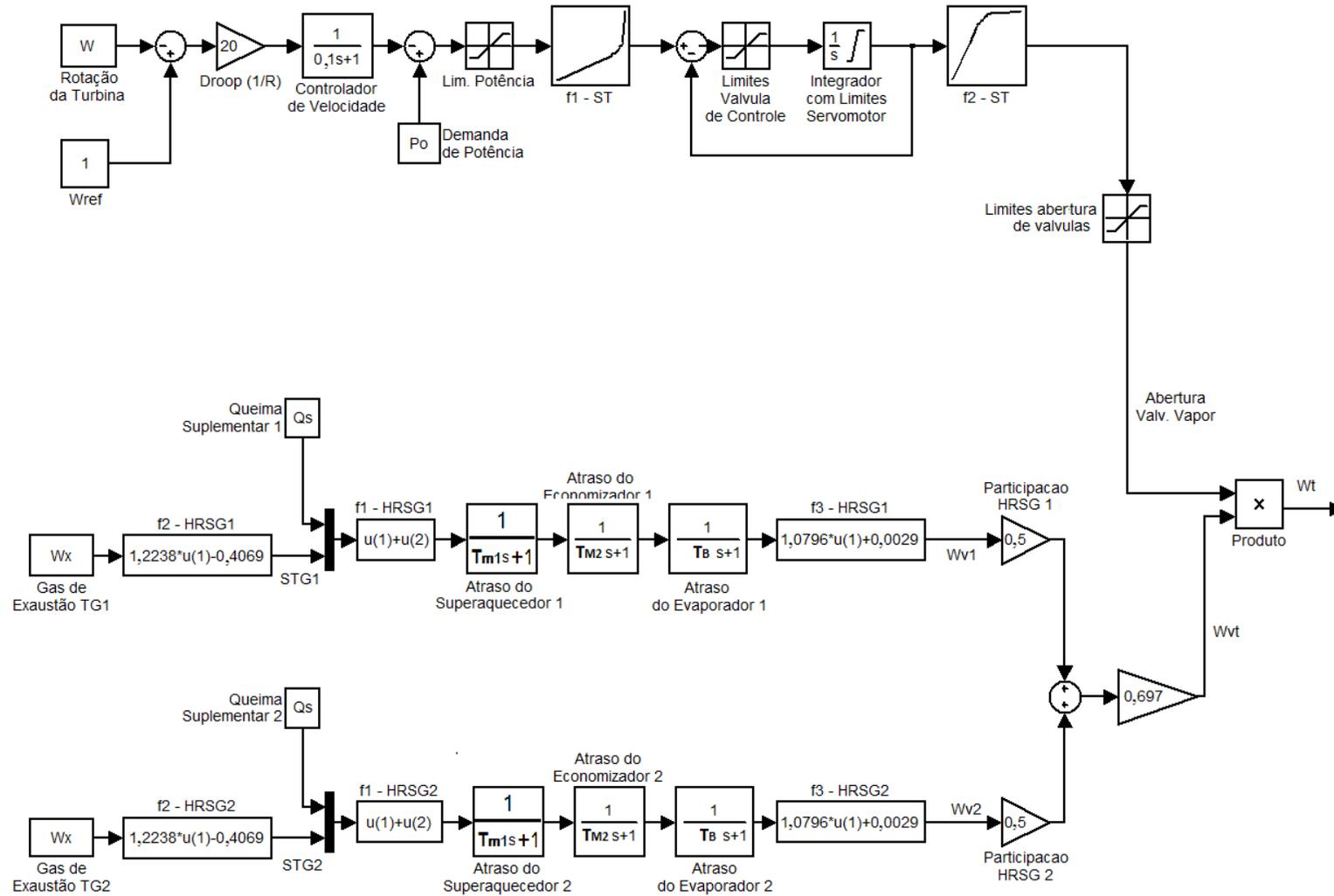
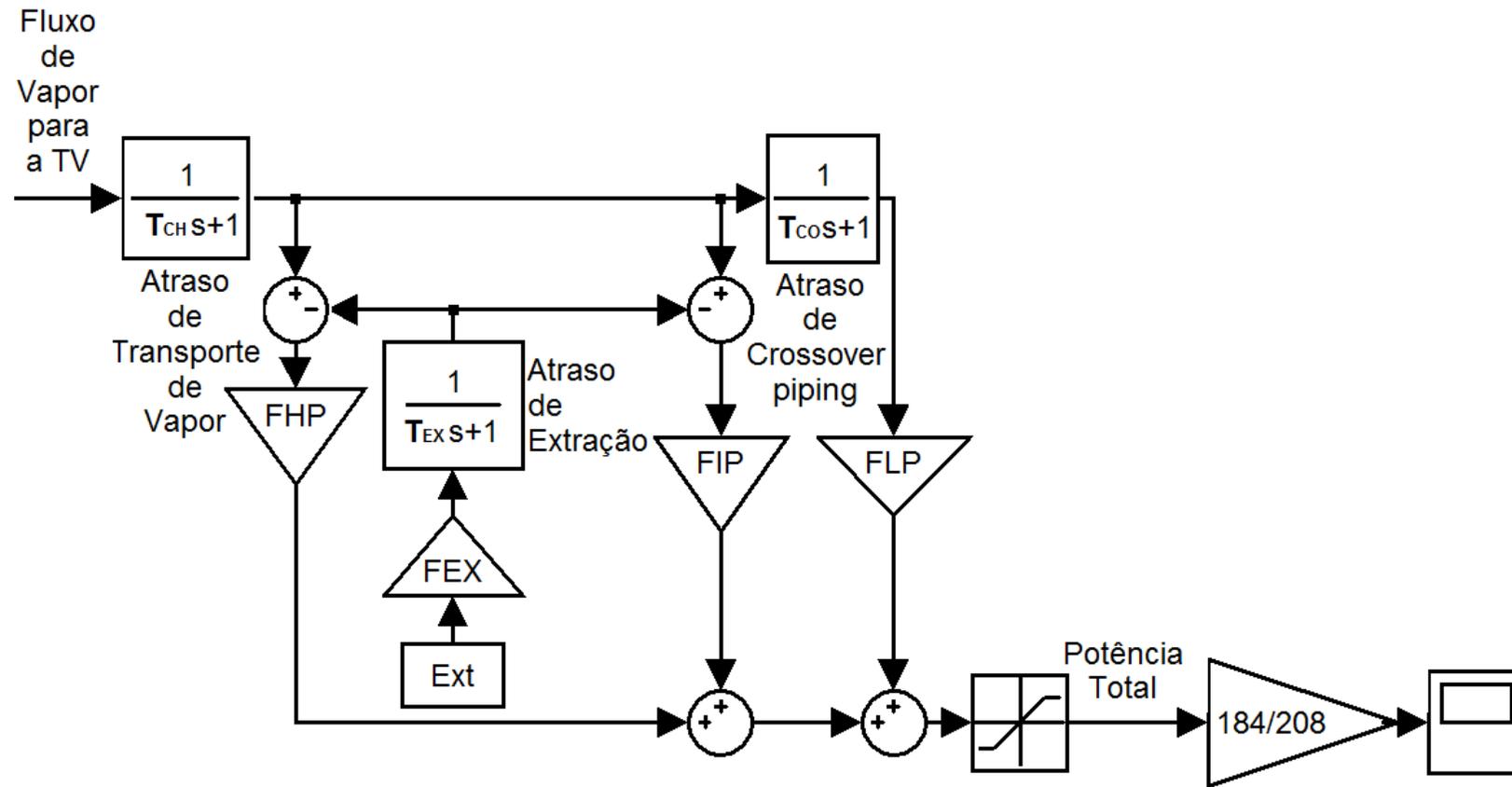


Figura 41 - Controle de Potência da Turbina a Vapor



10. SIMULAÇÃO DO MODELO DA HRSG E DA TV

O modelo implementado foi comparado com dados provenientes da Petrobras através de simulações. Dessa forma, foram escolhidos três dias de operação, pois esses dias tinham características importantes, como presença de variação de carga parcial, além de regime permanente. A taxa de dados fornecidos é de 1 segundo.

O Processo de validação foi utilizando a raiz do erro médio quadrático. As equações 18 e 19 representam esse processo.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_1^N (x - x_{ref})^2}{N}}}{X_{ref,max} - X_{ref,min}} \quad (18)$$

$$Val = (1 - NRMSE) * 100 \quad (19)$$

Onde x são os dados simulados, x_{ref} são os dados da Petrobras e N representa a quantidade de amostras.

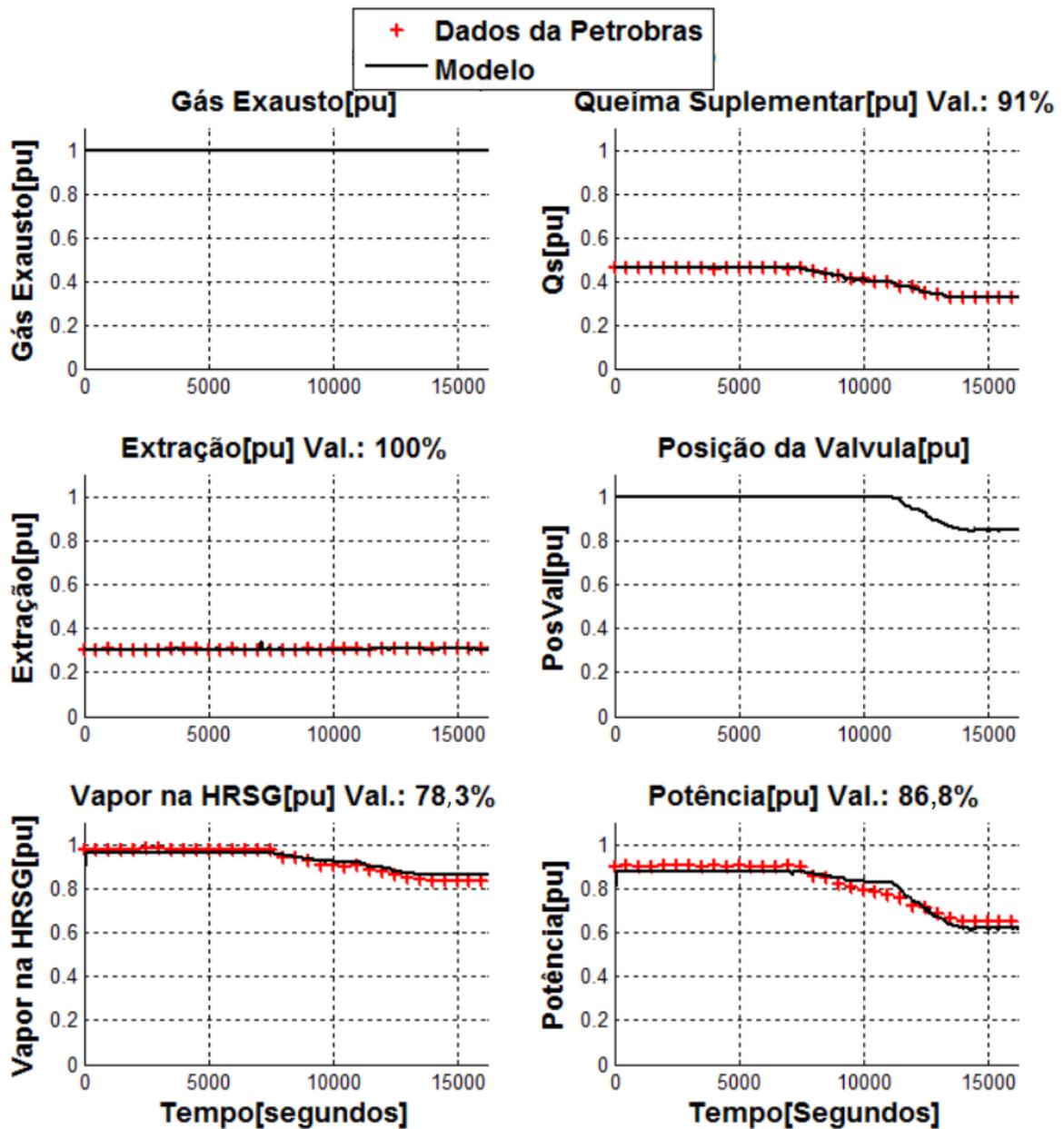
Tabela 13 - Relação de Casos de Simulação – HRSG e TV

Caso	Data	Início	Fim
Caso 1	30/03/2013	22:00:00	02:29:59
Caso 2	30/04/2014	04:00:00	05:59:59
Caso 3	31/10/2013	13:00:00	14:59:59

10.1.CASO 1

O caso 1 ocorreu no dia 30 de março de 2013. Os dados recolhidos foram entre 22:00:00 e 02:29:59. Os resultados podem ser vistos na Figura 42. Os valores de validação foram: Queima suplementar 91%, Extração 100%, Vapor na HRSG 78,3% e Potência de 86,8%.

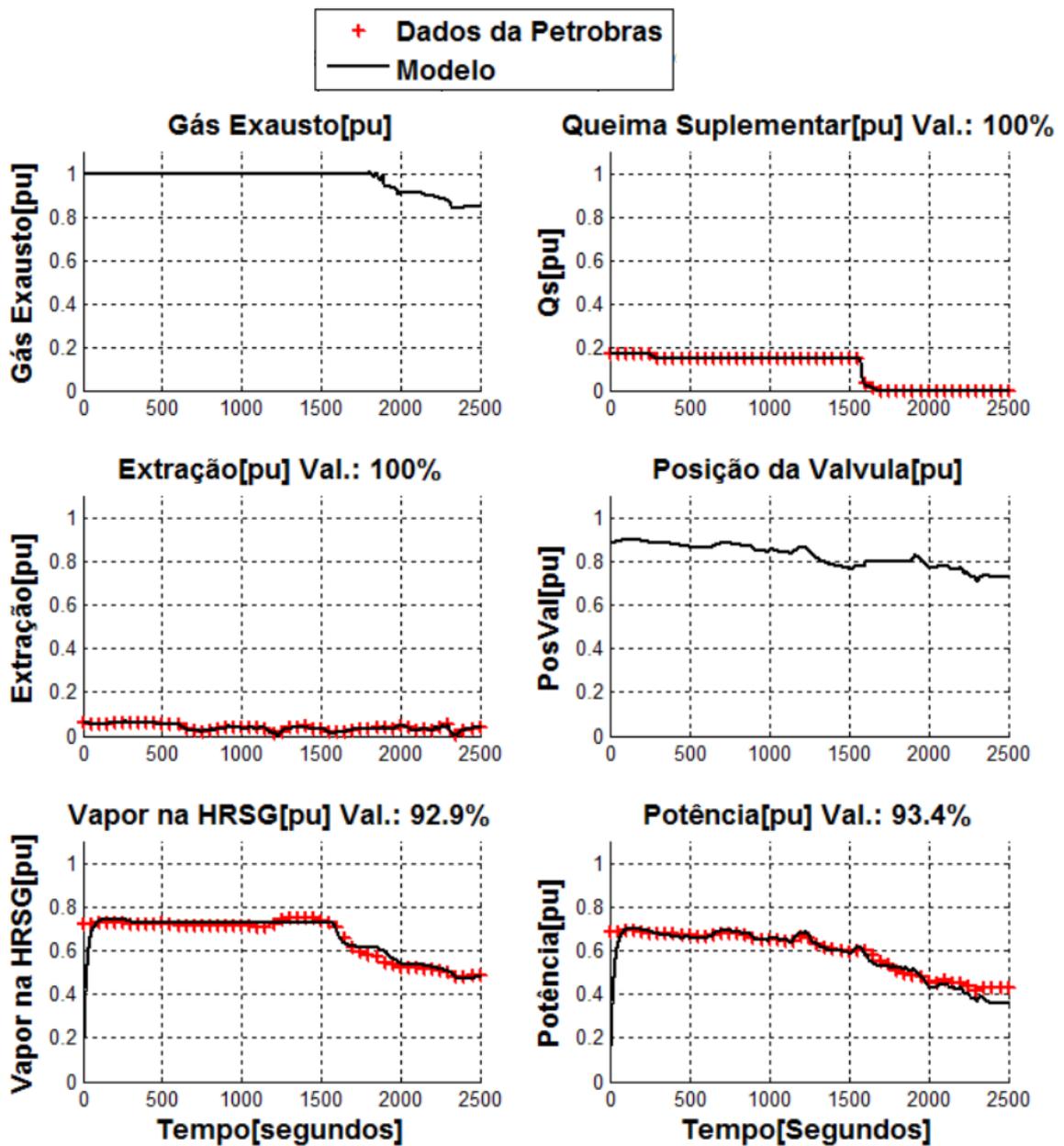
Figura 42 - Caso 1 - HRSG e TV



10.2.CASO 2

O caso 2 ocorreu no dia 30 de abril de 2014. Os dados recolhidos foram entre 4:00:00 e 05:29:59. Os resultados podem ser vistos na Figura 43. Os valores de validação foram: Queima suplementar 100%, Extração 100%, Vapor na HRSG 92,9% e Potência 93,4%.

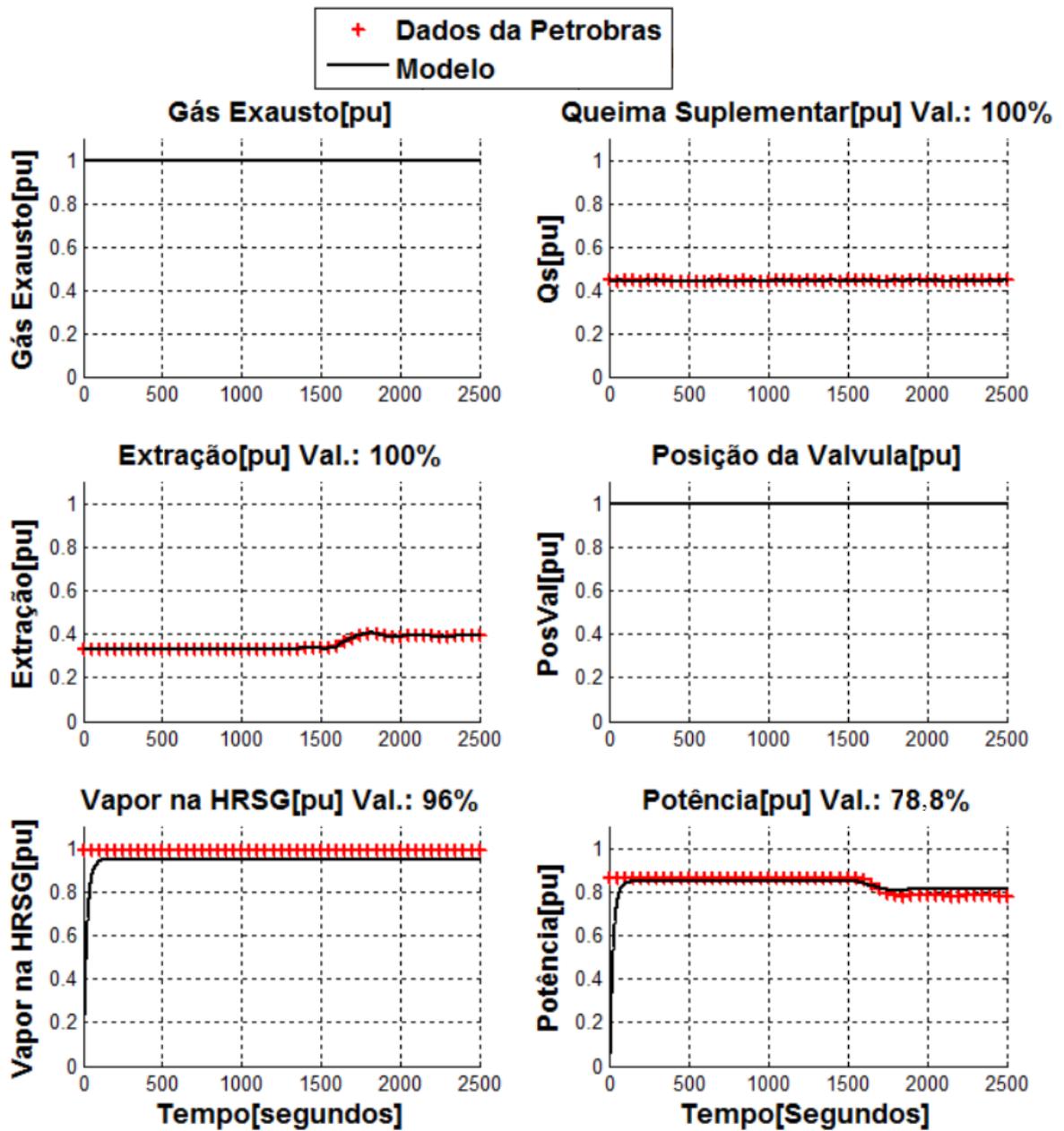
Figura 43 - Caso 2 - HRSG e TV



10.3.CASO 3

O caso 3 ocorreu no dia 31 de outubro de 2013. Os dados recolhidos foram entre 13:00:00 e 14:59:59. Os resultados podem ser vistos na Figura 44. Os valores de validação foram: Queima suplementar 100%, Extração 100%, Vapor na HRSG 96% e Potência 78,8%.

Figura 44 - Caso 3 - HRSG e TV



CONCLUSÃO

Os modelos presentes neste trabalho, tanto da TG como da HRSG e da TV, representam o comportamento dinâmico das variáveis envolvidas no bloco I na usina UTE GLB. O presente trabalho pode ser utilizado para representar outras usinas com ciclo combinado, com máquinas do mesmo modelo e fabricante ou até mesmo máquinas similares.

Em termos gerais o modelo da TG apresenta uma ótima validação, sendo que o menor valor de validação foi na vazão de combustível do caso 4, 88,8%. Dessa forma o modelo representa de forma aceitável a dinâmica da TG tanto em regime permanente como e regime transitório. O modelo utiliza a estrutura do modelo padrão da TG (ROWEN, 1992), sendo efetuadas modificações para adaptar-se à máquina estudada, tendo os principais pontos de modificação: os coeficientes das equações algébricas, limites de operação e ganhos, constantes de tempo de algumas funções de transferência, relação não linear entre a potência gerada pela TG e a posição do IGV, e implementar o controle por *TIT* através do atuador *IGV*.

Seguindo o mesmo procedimento do modelo da TG, os modelos das HRSG e TV começaram por validar as relações em regime permanente, definir valores base para as variáveis, calcular coeficientes de equações algébricas e fatores de participação. Para gerar uma resposta transitória tanto nas TG, que geram o gás na exaustão, quanto nas HRSG e TV é necessário dados com tempo de amostragem apropriado e as máquinas devem estar próximas das condições térmicas nominais de operação. Porém, para a validação dinâmica teve-se pouca disponibilidade de dados amostrados úteis, sob condições de variação de carga, o que dificultou o processo.

A solução foi utilizar modelos térmicos como o modelo térmico da TG (MARCATO, NOVGORODCEV JUNIOR, *et al.*, 2015), que tinham sido previamente validados. As constantes de tempo validadas no modelo da HRSG coincidiram em ordem de grandeza com os valores anteriores obtidos da literatura. Na simulação do modelo completo a menor validação foi 78,3% para a vazão de vapor da HRSG no caso 1, o que demonstra uma ótima aproximação do modelo da HRSG e da TV.

Uma vantagem de empregar dados dos modelos térmicos para validar os modelos dinâmicos é a possibilidade de comparar a resposta que ambos os modelos fornecem para o mesmo problema. As duas abordagens são muito diferentes, já que o modelo térmico possui equações que representam as relações físicas entre as variáveis mecânicas das máquinas, ajustadas com dados reais em regime permanente e com valores teóricos dos materiais e dimensões dos trocadores de calor, ou obtidos desde informação técnica do fabricante (MARCATO, NOVGORODCEV JUNIOR, *et al.*, 2015). Este tipo de análise permite entender melhor a estrutura e as vantagens de cada uma.

O tratamento do grande número de dados enviados pela Petrobrás foi um grande desafio do trabalho. A escolha dos casos de simulação foi feita levando em conta a mudança de carga parcial, a época do ano em que foi escolhida e a variação das TG, HRSG e TV. Dessa forma, o modelo poderia ser mais amplo e explorar máquinas diferentes em situações distintas. Levando em conta os sensores disponíveis e as variáveis do modelo ocorreram dificuldades em relação a falta de dados de algumas variáveis, que tiveram que ser determinadas através de tentativa e erro, comparando o resultado da simulação com a resposta dos dados. Esse método de ajuste, principalmente da equação f_1 , que calcula TAT , gerou um comportamento onde o modelo correspondia nas temperaturas extremas e não em carga parcial. Essa verificação gerou os blocos adicionais desse trabalho para representar o comportamento do IGV e o controle por TIT , não presentes no modelo padrão (ROWEN, 1992).

Além disso, faltaram dados experimentais relativos a um transitório de ilhamento, sendo uma sugestão para futuros trabalhos a modelagem de outras usinas para melhor validação do modelo que possuam dados em modo ilhado. Dessa forma, modelos mais aprimorados podem servir como ferramentas para a tomada de decisões seja para melhorar o funcionamento da usina, como para alterar a sequência de manutenção e operação aumentando a confiabilidade do sistema nos mais diversos eventos, não ficando restrito somente a turbinas para produção elétrica.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L.. **Introdução à identificação de sistemas -Técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas:** Teoria e Aplicação. 2ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004.

ALSTOM (SWITZERLAND) LTD. **GT11N2 Gas Turbine.** Alstom. [S.l.], p. 16. 2007.

ALVES, M. A. D. C.; BARBOSA, R. A Step Further in Gas Turbine Dynamic Simulation. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part A Journal Of Power And Energy**, Inglaterra, p. 583-592, 2003.

CASAROSA, ; FRANCO,. Thermodynamic optimization of the operative parameters for the heat recovery in combined power plants. **Int. J. Applied Thermodynamics**, Março 2001. 43-52.

DA SILVA,. **Análise Termoeconômica de uma Usina Termelétrica a Carvão Mineral.** UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ. ITAJUBÁ, p. 297. 2004.

DE ALÉM, A. C. D. **Cenários Macroeconômicos 1997–2002.** BNDES. [S.l.], p. 56. 1997.

DE MELLO, F.; AHNER, D. Dynamic models for combined cycle plants in power system studies. **IEEE Transactions on Power Systems (Institute of Electrical and Electronics Engineers)**, v. IX, 1994.

DE OLIVEIRA JÚNIOR, J. C.. **Projeto de caldeira de recuperação para geração de vapor que opera em conjunto com micro turbina a gás.** ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. São Paulo, p. 246. 2009.

FERNANDES, E. et al. Natural-gas-powered thermoelectricity as a reliability factor in the Brazilian electric sector. **Elsevier Energy Policy**, v. 36, n. 3, p. 999–1018, Março 2008.

FUPAI. **Avaliação dos Novos Modelos para Turbinas a Gás e Vapor da UTE TERMORIO.** UNIFEI. Itajubá. 2008.

JORDÃO, E. **Estudos de Ilhamento da UTE Governador Leonel Brizola (UTE GLB) e a Refinaria Duque de Caxias (REDUC).** Rio de Janeiro. 2012.

KEHLHOFER, R. et al. **Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants.** 3ª. ed. [S.l.]: PennWell Corp, v. I, 2009.

LOPEZ MARINHO ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES LTDA. Lopez Marinho Engenharia e Construções Ltda., 2012. Disponível em: <Lopez Marinho Engenharia e Construções Ltda.>. Acesso em: 5 out. 2015.

MARCATO, A. L. et al. Modelagem do Sistema Elétrico e Térmico de uma UTE em Ciclo Combinado com Cogeração. **Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica CITENEL**, Costa do Saúpe - Bahia, 2015.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5^a. ed. [S.l.]: Pearson, 2011.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**, 2013. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>. Acesso em: 15 Julho 2015.

PAMPREEN, R. C. **The Use of Variable Inlet Guide Vanes for Automotice Gas Turbine Engine Augmentation and Load Control**. Automotive Engineering Congress and Exposition. Detroit: [s.n.]. Fevereiro 1976.

PUC - RIO. **Fundamentos Teóricos**. PUC - Rio. Rio de Janeiro, p. 16.

QUEIROZ, M.; MATIAS, J. A. **Básico de Turbina a Gás**. Petrobrás. [S.l.], p. 87. 2003.

REBOUCAS, R. R.; HEMERLY, E. M.; ALVES, M. A. D. C. **Dynamic Modeling, Control and Simulation of Single Shaft Gas Turbine**. XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Brasília: [s.n.]. 2007.

ROWEN, W. I. Simplified Mathematical Representations of Heavy-Duty Gas Turbines. **Journal of Engineering for Power**, v. 105, p. 865 - 869, Outubro 1983.

ROWEN, W. I. Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, Outubro 1983. 865-869.

ROWEN, W. I. Simplified Mathematical Representations of Single Shaft Gas Turbines in Mechanical Drive Service. **Turbomachinery International**, p. 7, Agosto 1992.

ROWEN, W. I. Simplified mathematical representations of single shaft gas turbines in mechanical drive service. **Turbomachinery International**, Agosto 1992. 26-32.

ROWEN, W. I.; VAN HOUSEN, R. L. Gas Turbine Airflow Control for Optimum Heat Recovery. **Journal od Engineering for Power**, v. 105, p. 72 - 79, Janeiro 1983.

SULATO, A. D. A. **MÁQUINAS TÉRMICAS AT-101**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 34.

WORKING GROUP ON PRIME MOVER AND ENERGY SUPPLY MODELS FOR SYSTEM DYNAMIC PERFORMANCE STUDIES. Dynamic Models For Fossil

Fueled Steam Units In Power System Studies. **IEEE Transactions on Power Systems**, Maio 1991. 753-761.