



MODELAGEM DINÂMICA NÃO LINEAR DE TURBINA FRANCIS A PARTIR DE DADOS DE ENSAIO DE MODELO REDUZIDO

GRUPO 4 – GAT 23

Guilherme Domingues de Cerqueira
(FURNAS)

Pedro Paulo de C. Mendes
(Consultor Independente, Prof. Voluntário UNIFEI)

Nilo José P. de Macedo
(Consultor Independente)



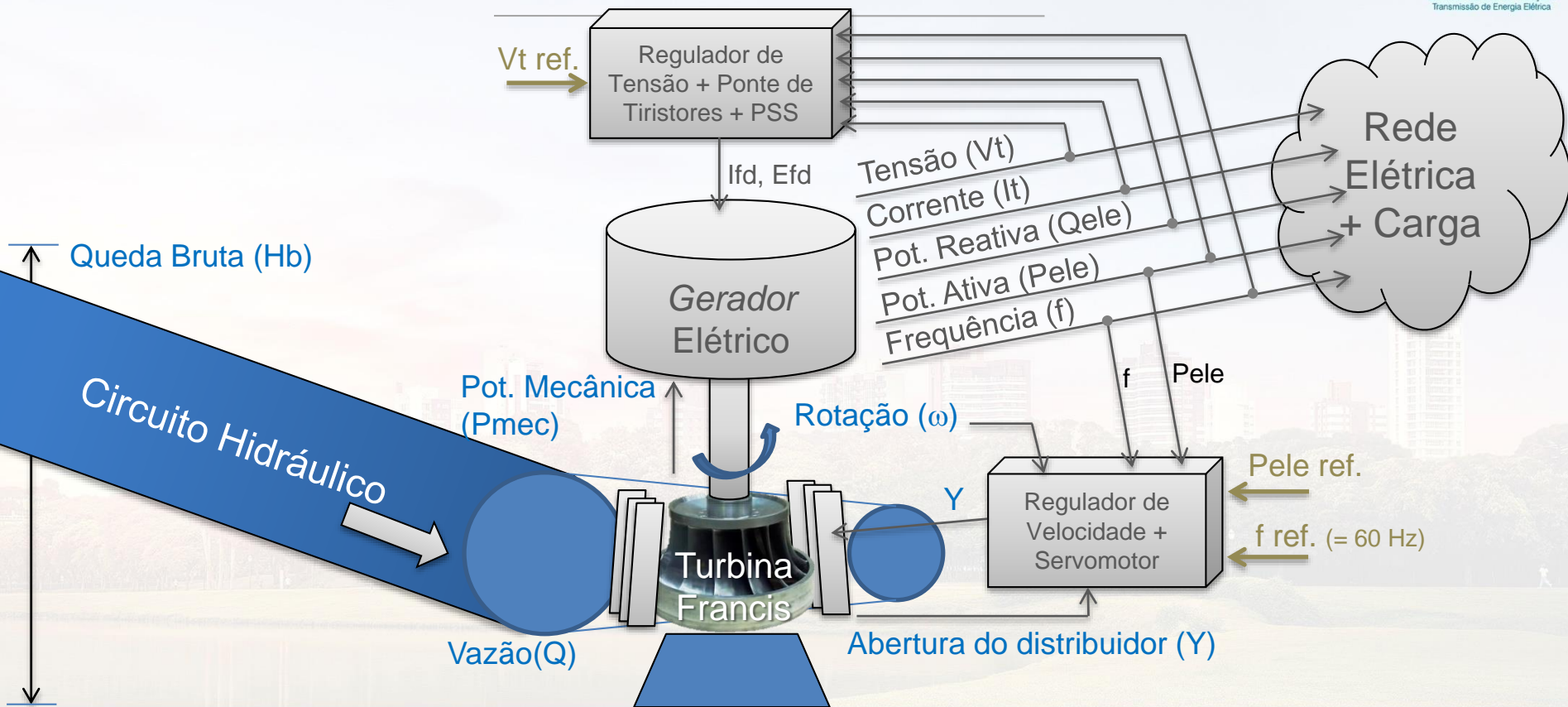
Introdução

- Este trabalho apresenta o aprimoramento de modelo computacional de turbina Francis, para estudos de estabilidade eletromecânica;
- Os modelos atuais não tem reproduzido de forma satisfatória a dinâmica observada em ensaios de campo, principalmente com a queda hidráulica fora do valor nominal;
- A modelagem da turbina inspirou-se na que foi realizada por Itaipu Binacional, na década de 80, no programa CSMP (*Continuous System Modelling Program*)-IBM;
- Por limitações do software utilizado na época pelo setor elétrico (TRANSDIR), o modelo não linear completo teve que ser parcialmente reduzido e linearizado;

Objetivo do Trabalho

- Aprimorar o modelo de turbina Francis e seu circuito hidráulico, no programa ANATEM (UHE Furnas);
- Validar o modelo de simulação através de comparação com oscilografias de ensaios feitos na usina;

Objetivo do Trabalho



Ensaaios de modelo reduzido de turbina



Laboratório de ensaios de turbinas hidráulicas da NOHAB, em 1960



Vista superior da área de teste do modelo da turbina

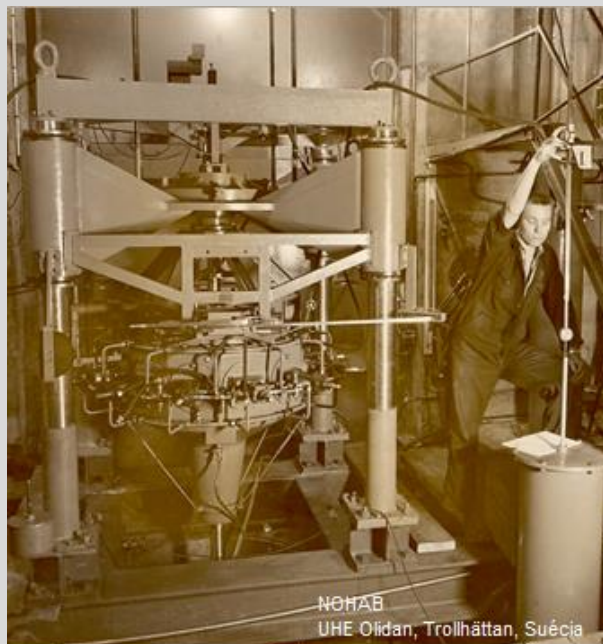
Ensaio de modelo reduzido de turbina

Ensaio UHE Furnas - NOHAB

- D_modelo= 50 cm (Potencia, Rendimento, Disparo, Index); = 30 cm (Cavitação);
- D_protótipo=5,44 m;
- Relação= 1:10,88 1:18,13



Medição de vazão (“traveling screen”)



Frenagem do eixo (Pmec) e
medição da rotação



Central de instrumentos com medição eletrônica

Ensaios de modelo reduzido de turbina



Ensaio de modelo reduzido de turbina

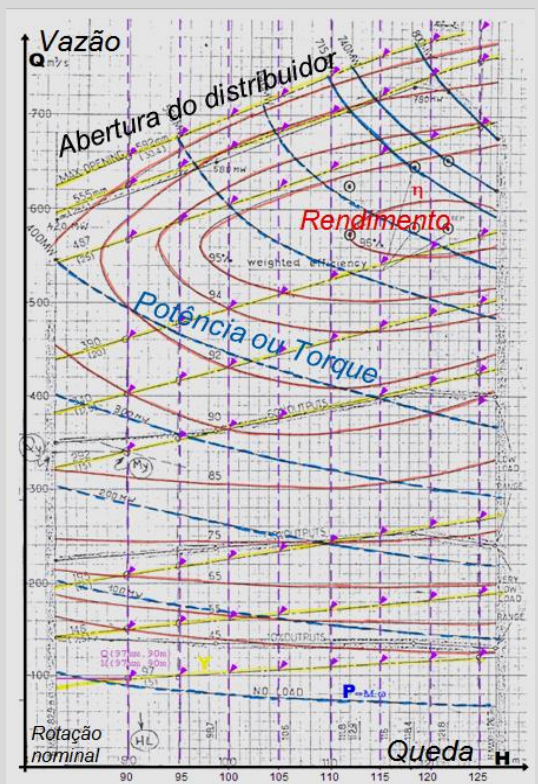


Diagrama de colina típico

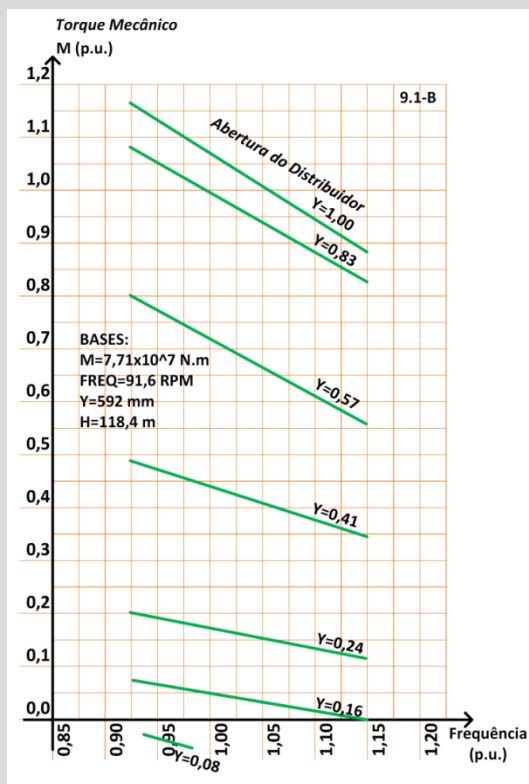


Diagrama do Torque x Rotação $f(Y)$

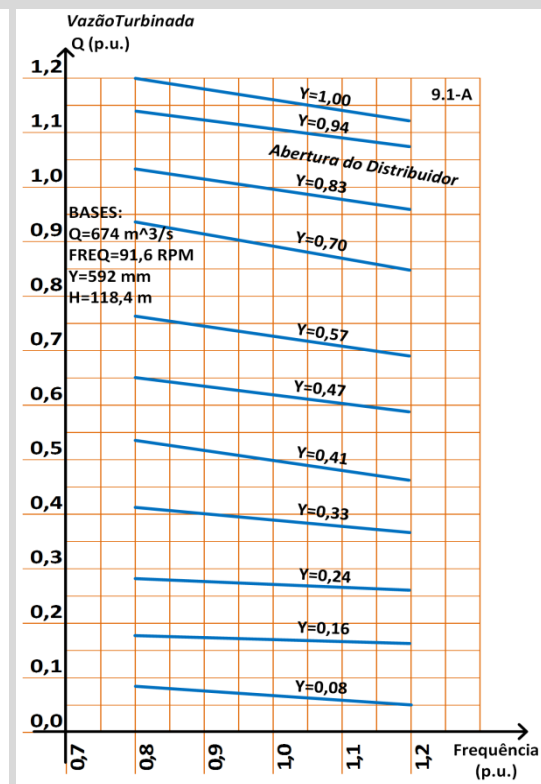
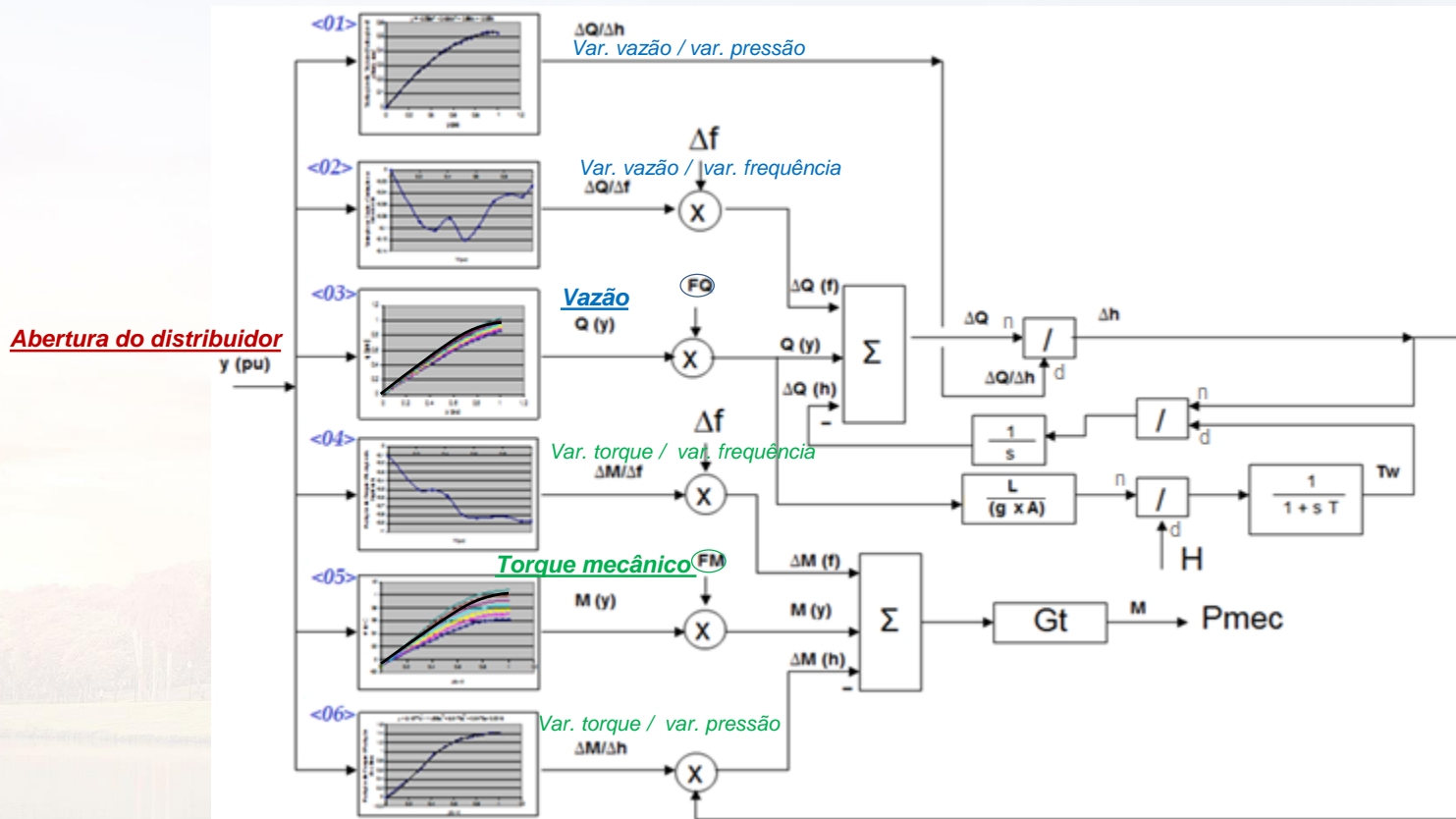


Diagrama do Vazão x Rotação $f(Y)$

Adaptado da Dissertação de Mestrado de Marcelino P. Almeida, 1987, EFEI

Modelo de turbina Francis

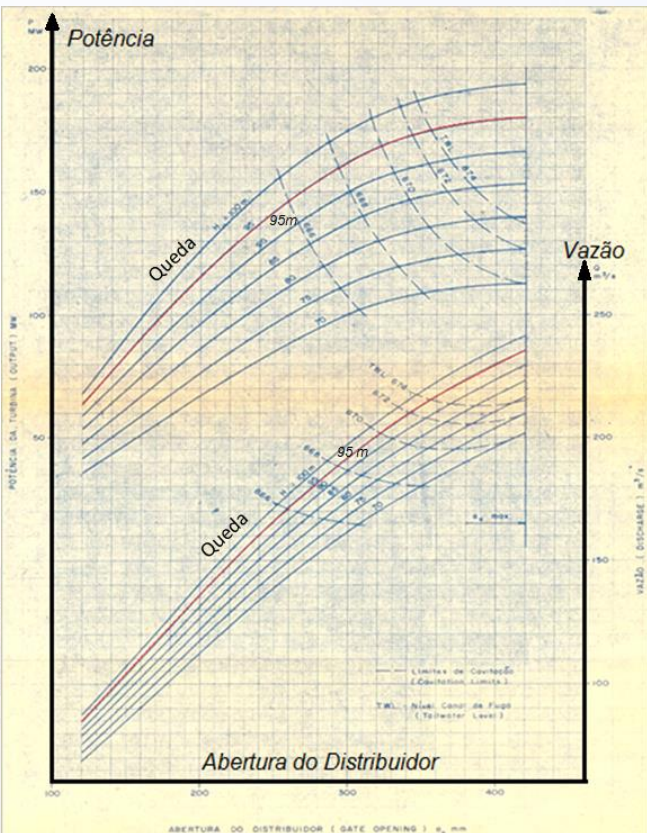


Considerações

- Nesse trabalho, a característica de inércia da água no conduto (T_w), é considerada dinâmica, variando com a vazão e com a queda;

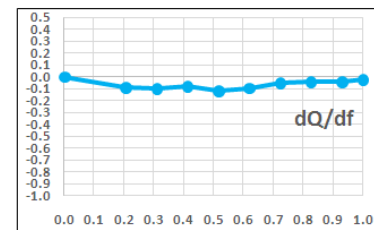
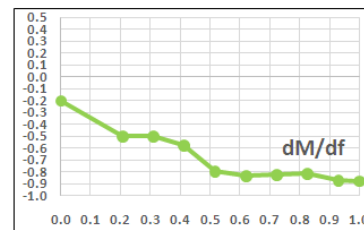
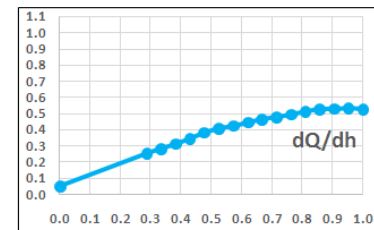
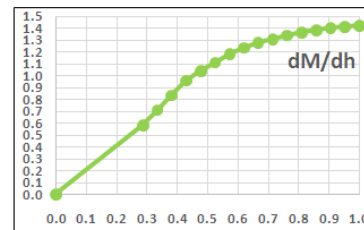
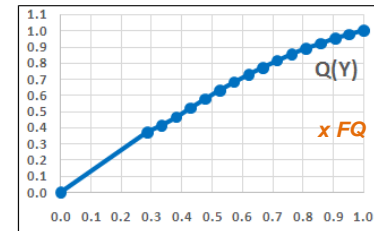
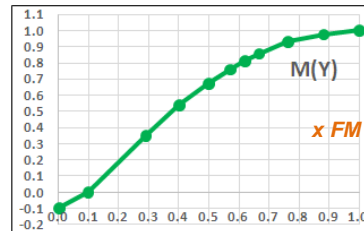
$$T_w = \frac{\dot{Q}_n}{H_{bn} \cdot g} \cdot \sum \frac{L}{A}$$
- A inicialização do modelo não é direta, necessita de curvas inversas para o cálculo da abertura (Y_o) e da vazão (Q_o) iniciais, em função do ponto operativo;
- O acesso aos diagramas de colina das turbinas, não é trivial, pois não são facilmente divulgados, como as “*curvas de capability*” de geradores, por exemplo;
- Os dois diagramas adicionais do torque e vazão, com variação da rotação, não costumam ser fornecidos de forma padronizada em todos os projetos;
- Na ausência de dados de ensaio de modelo reduzido, pode-se tentar utilizar dados obtidos da operação da turbina real (protótipo);

Dados da UHE Furnas



Parâmetro	Valor
Fabricante	Nohab
Queda bruta	95 m
Vazão máxima	242 m³/s
Abertura máx.do distribuidor	420 mm
Rotação	150 rpm
Potência mecânica máxima	210000 c.v. ≈154,5 MW
Potência elétrica (= P _{mec} * 98,5%)	152 MW aprox..
Potência aparente do gerador	160 MVA

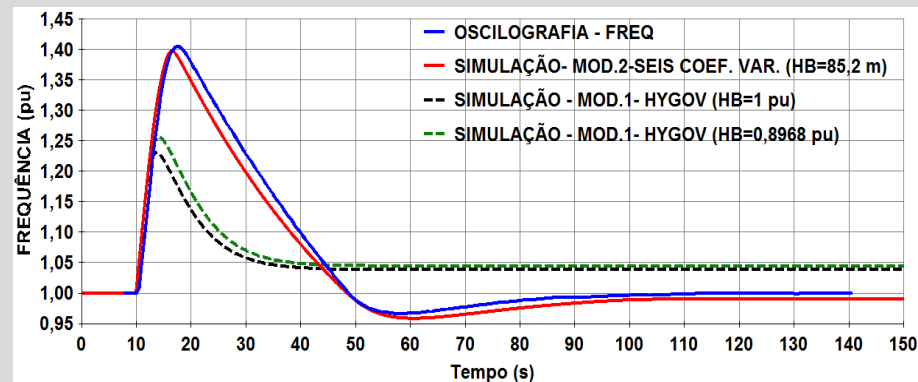
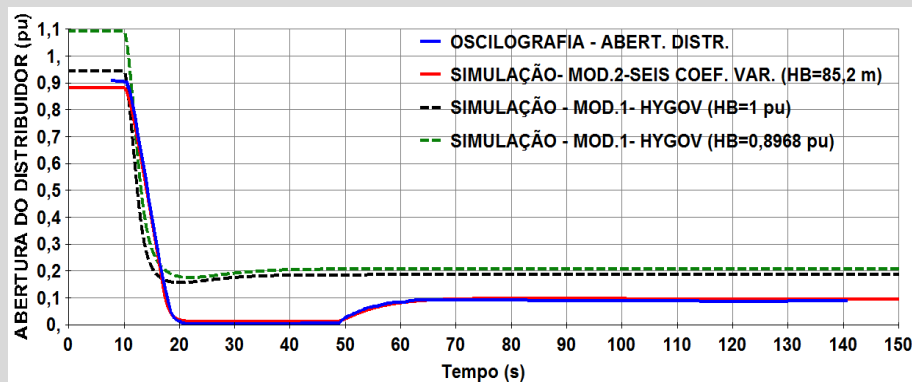
Curvas características levantadas



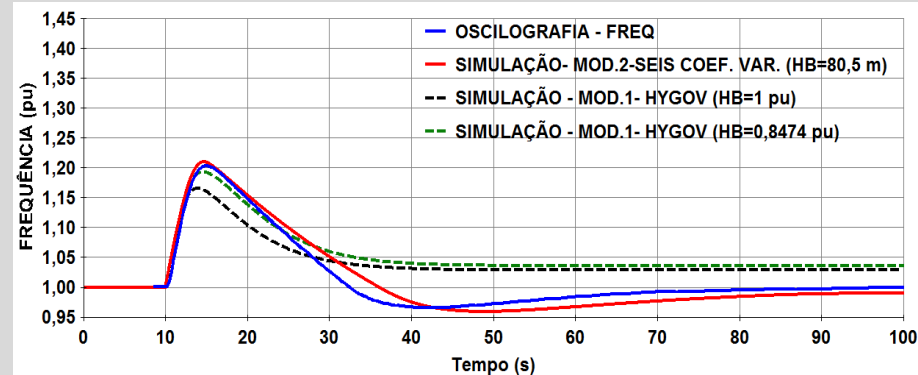
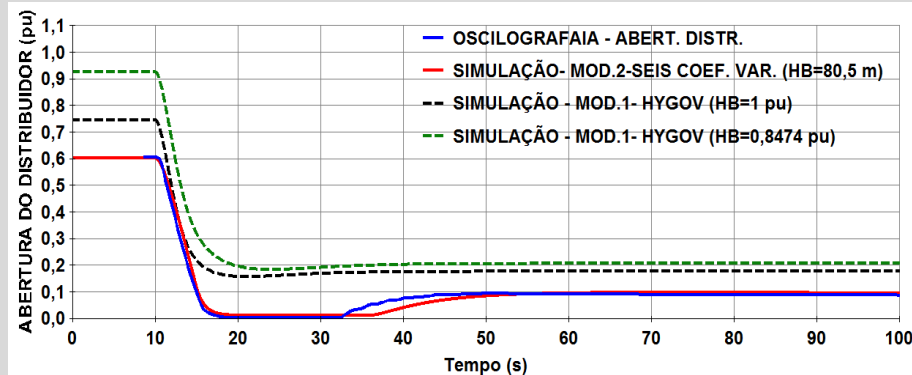
Simulações

- Para as mesmas condições de queda dos ensaios reais, foram realizadas simulações de rejeições de carga (100%, 75% e 25% de 152MW) e degrau de potência (-5%);
- Foram usados dois modelos de turbina aplicados para a UHE Furnas:
 - ❖ Modelo não linear HYGOV (PTI), tradicional do banco de dados do ONS ;
 - ❖ Novo modelo não linear baseado em seis curvas características;
- Também foram realizadas algumas simulações adicionais de sensibilidade em relação à altura de queda bruta do reservatório;

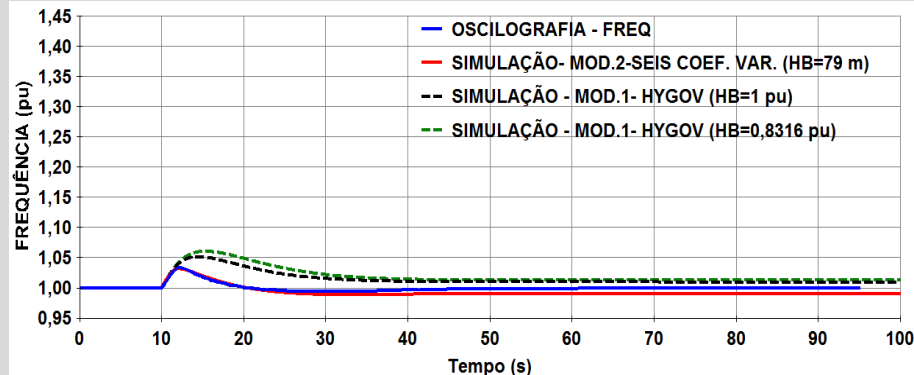
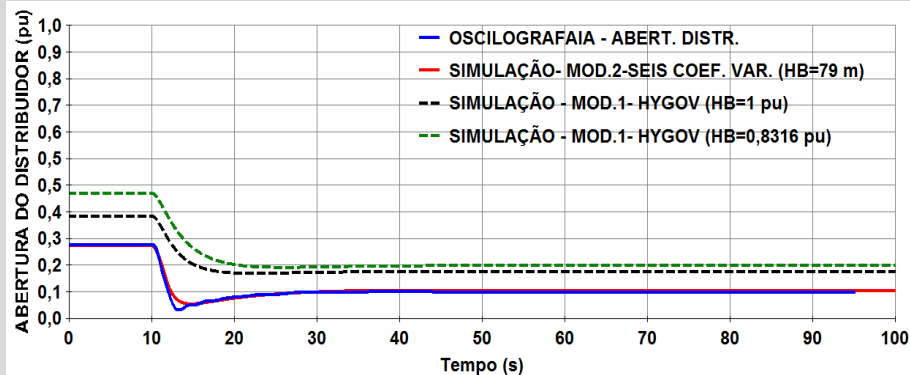
➤ Rejeição de 100% de carga, com $H_b=85,2$ m [abertura do distribuidor / frequência]



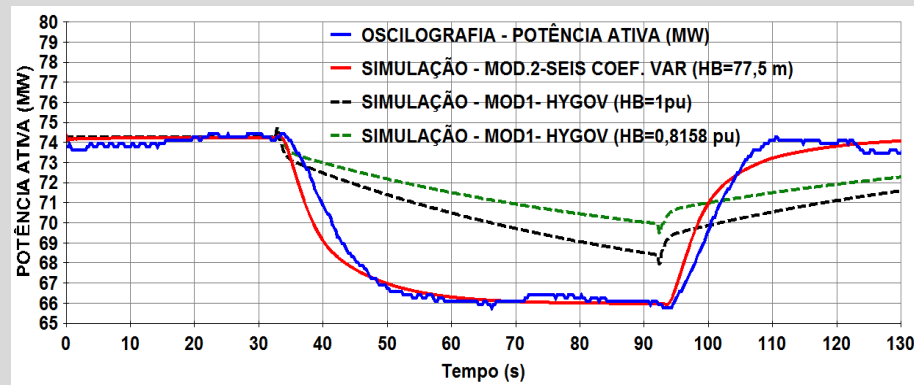
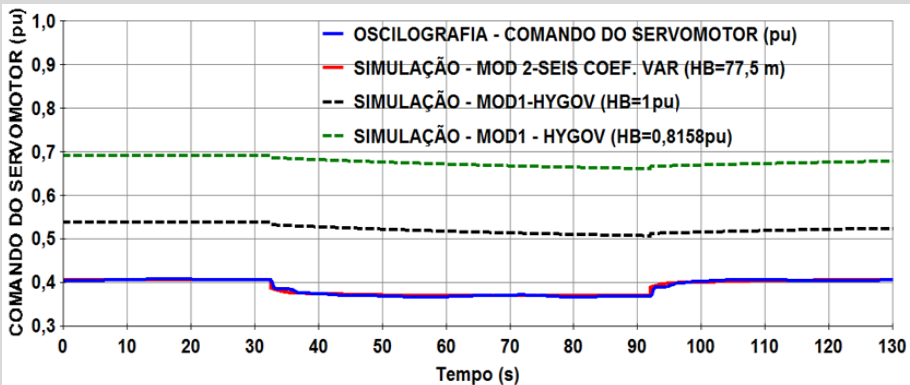
➤ Rejeição de 75% de carga, com $H_b=80,5$ m [abertura do distribuidor / frequência]



➤ Rejeição de 25% de carga, com $H_b=79$ m [abertura do distribuidor / frequência]

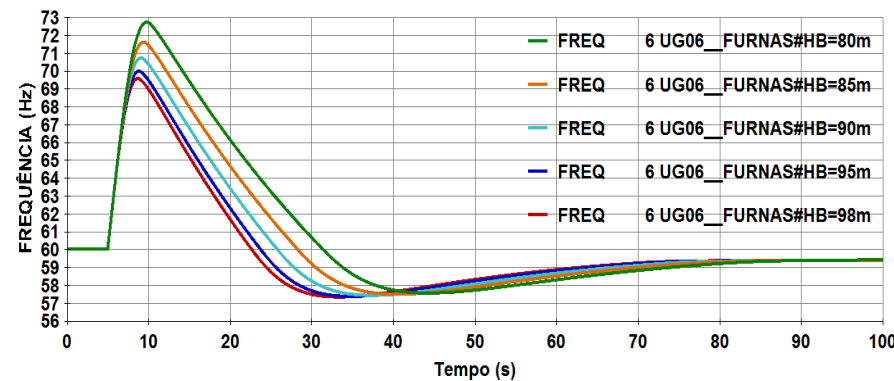
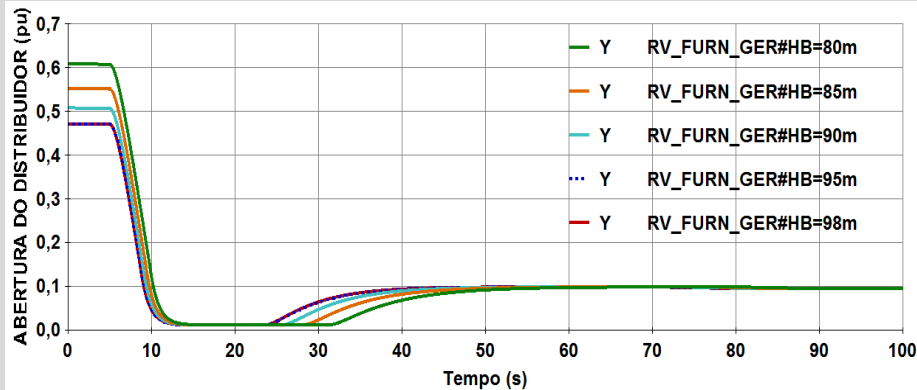


➤ Degrau de potência de -5% (-8MW), com $H_b=77,5$ m [cmd abertura distribuidor / potência ativa (MW)]



Simulações adicionais

➤ Variando a queda bruta de 80 a 98 m, rejeições de 75% de carga [abertura do distribuidor / frequência]



- Menor queda bruta \Rightarrow maior abertura do distribuidor, para ter a mesma geração;
- Após rejeição \Rightarrow maior tempo para fechar distribuidor \Rightarrow maior sobre velocidade;
- Boa prática: consultar diagrama de colina que originou o modelo \Rightarrow verificar se a potência aplicada na simulação é compatível com queda escolhida;

Conclusões

- O novo modelo de turbina para a UHE Furnas apresentou um desempenho bastante satisfatório, mostrando uma boa aderência com as curvas dos ensaios reais;
- As simulações com o modelo já validado permitem obtenção de experiência em relação às variáveis hidráulicas envolvidas na dinâmica do grupo gerador;
- Por se tratar de um modelo com bastante valor agregado da área da engenharia mecânica e hidráulica, torna-se um bom desafio para os eletricitistas durante a construção do modelo;
- Esse tipo de modelo é recomendável para estudos de usinas: com significativas variações da queda bruta, isoladas por sistemas HVDC, ou sujeitas a ilhamento;

Ações Futuras

- Para futuros ensaios em laboratório de hidráulica, sugere-se obter os dados em planilhas digitais, facilitando o tratamento das informações;
- Obter mais oscilografias de ensaios na usina, em quedas hidráulicas diversas, para refinar o modelo computacional da turbina;
- Aplicar essa metodologia para a modelar turbinas Francis de outros projetos;
- Comparar as curvas características desses outros projetos e verificar se é possível construir curvas típicas para grupos de turbinas semelhantes;
- Aplicar o modelo para outros tipos de turbinas, como por exemplo Kaplan, Pelton, Bulbo, entre outras;

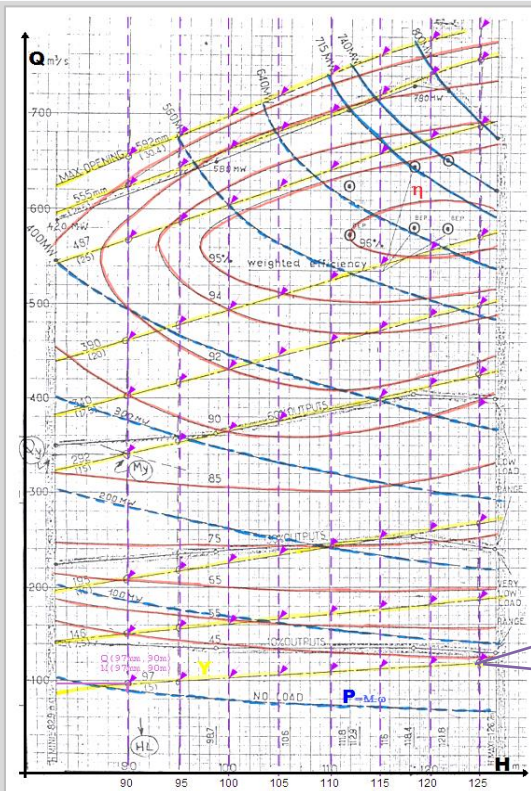
Guilherme Domingues de Cerqueira

 (21) 2528-3602

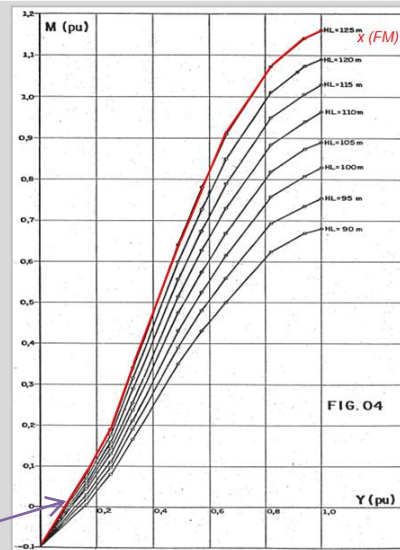
 (21) 98109-0182

 gdc@furnas.com.br

Extras

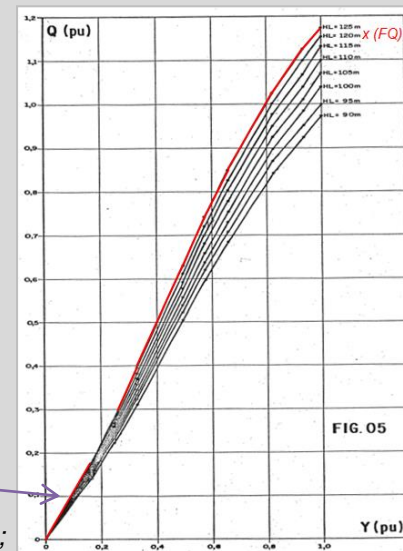


- <1>**
- ⇒ Para cada Queda: registrar a Abertura x Torque;
 - ⇒ Repetir procedimento para outras Aberturas e Quedas;



- ⇒ Para simplificar o modelo usar os fatores FM e FQ em função da Queda, para representar a família de curvas;

- <2>**
- ⇒ Para cada Queda: registrar a Abertura x Vazão;
 - ⇒ Repetir procedimento para outras Aberturas e Quedas;

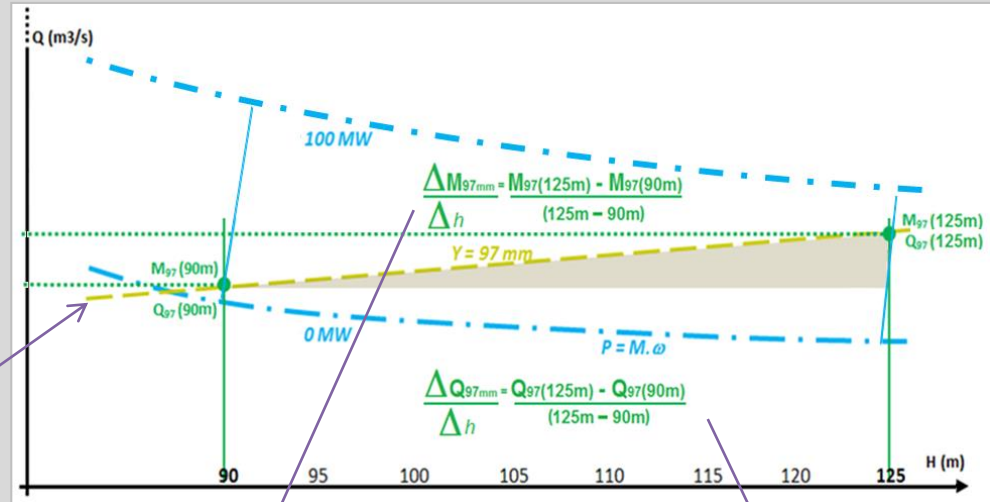
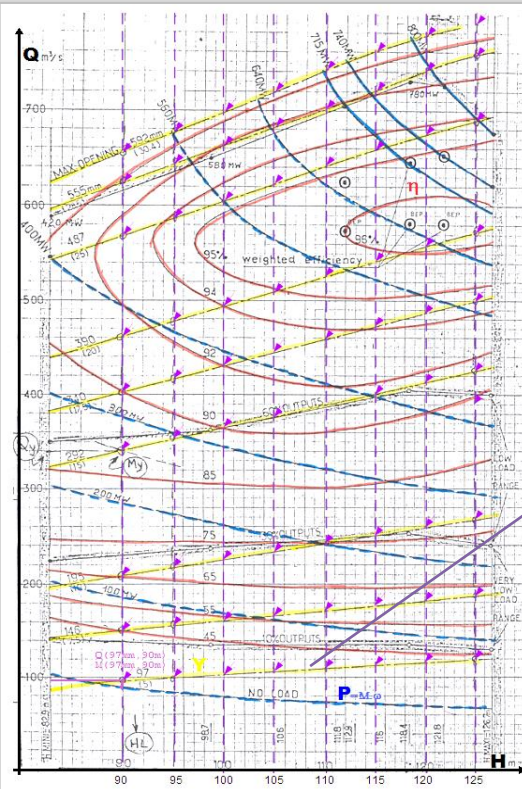


Adaptado da Dissertação de Mestrado de Marcelino P. Almeida, 1987, EFEI

MODELAGEM DINÂMICA NÃO LINEAR DE TURBINA FRANCIS A PARTIR DE DADOS DE ENSAIO DE MODELO REDUZIDO

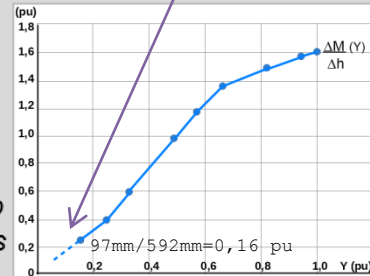
GAT 23 – Guilherme Domingues de Cerqueira

Extras



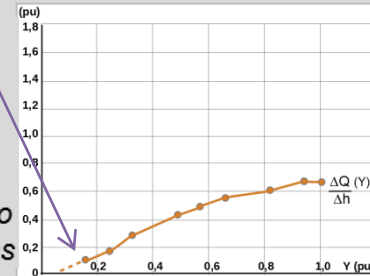
<3>
⇒ Para cada Abertura, calcular:
$$\frac{(M_{Hmax} - M_{Hmin})}{(Hmax - Hmin)}$$

⇒ Repetir procedimento para outras Aberturas



<4>
⇒ Para cada Abertura, calcular:
$$\frac{(Q_{Hmax} - Q_{Hmin})}{(Hmax - Hmin)}$$

⇒ Repetir procedimento para outras Aberturas

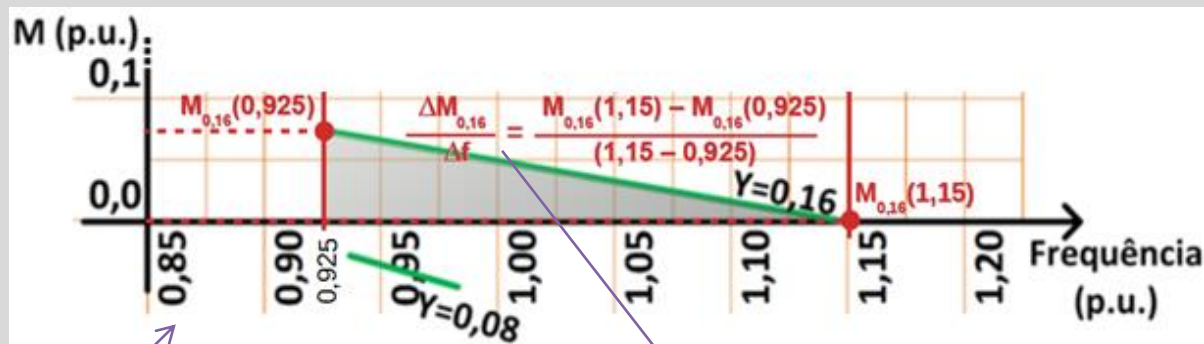
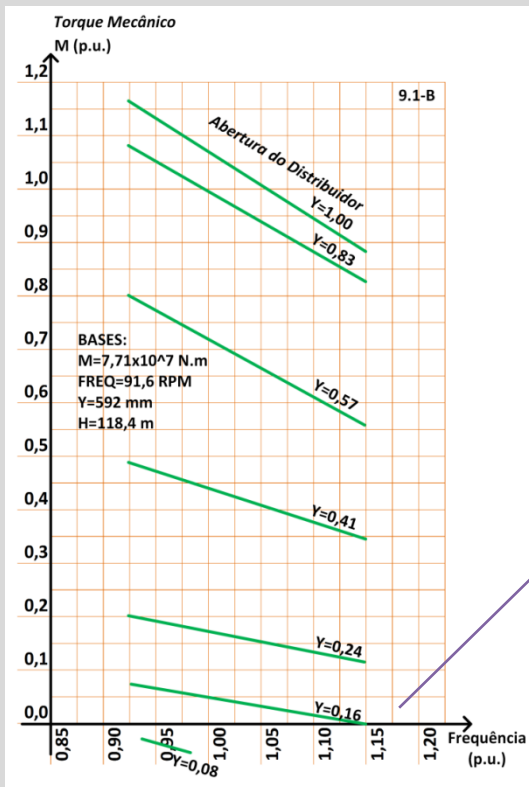


Adaptado da Dissertação de Mestrado de Marcelino P. Almeida, 1987, EFEI

MODELAGEM DINÂMICA NÃO LINEAR DE TURBINA FRANCIS A PARTIR DE DADOS DE ENSAIO DE MODELO REDUZIDO

GAT 23 – Guilherme Domingues de Cerqueira

Extras

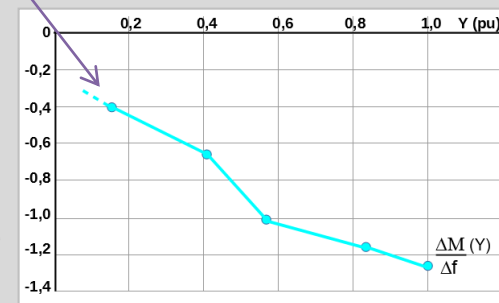


<5>

⇒ Para cada Abertura, calcular:

$$\frac{(M_{fmax} - M_{fmin})}{(f_{max} - f_{min})}$$

⇒ Repetir procedimento para outras Aberturas

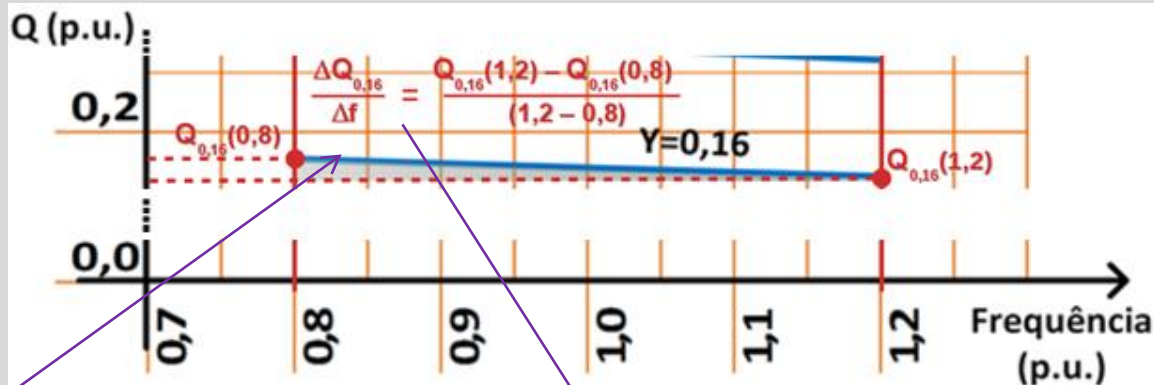
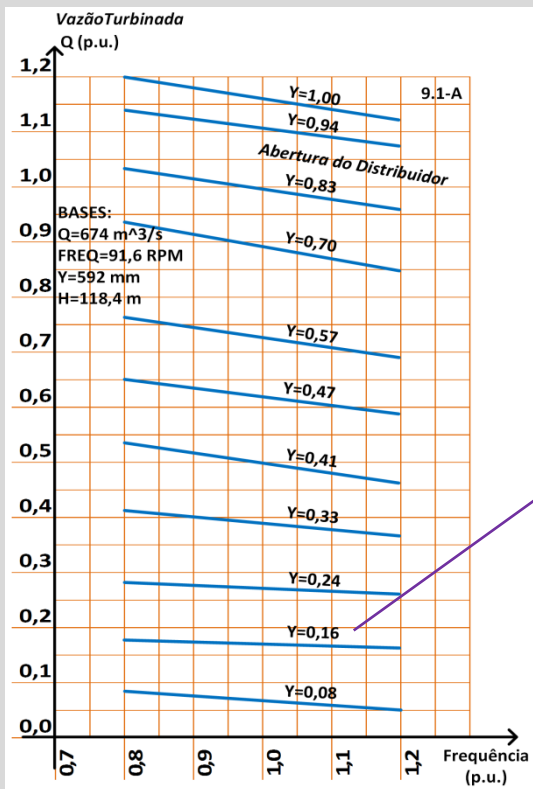


Adaptado da Dissertação de Mestrado de Marcelino P. Almeida, 1987, EFEI

MODELAGEM DINÂMICA NÃO LINEAR DE TURBINA FRANCIS A PARTIR DE DADOS DE ENSAIO DE MODELO REDUZIDO

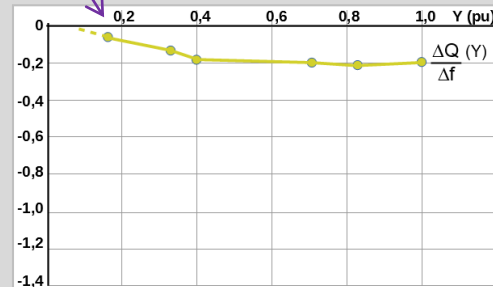
GAT 23 – Guilherme Domingues de Cerqueira

Extras



<6>
⇒ Para cada Abertura, calcular:
$$\frac{(Q_{fmax} - Q_{fmin})}{(f_{max} - f_{min})}$$

⇒ Repetir procedimento para outras Aberturas



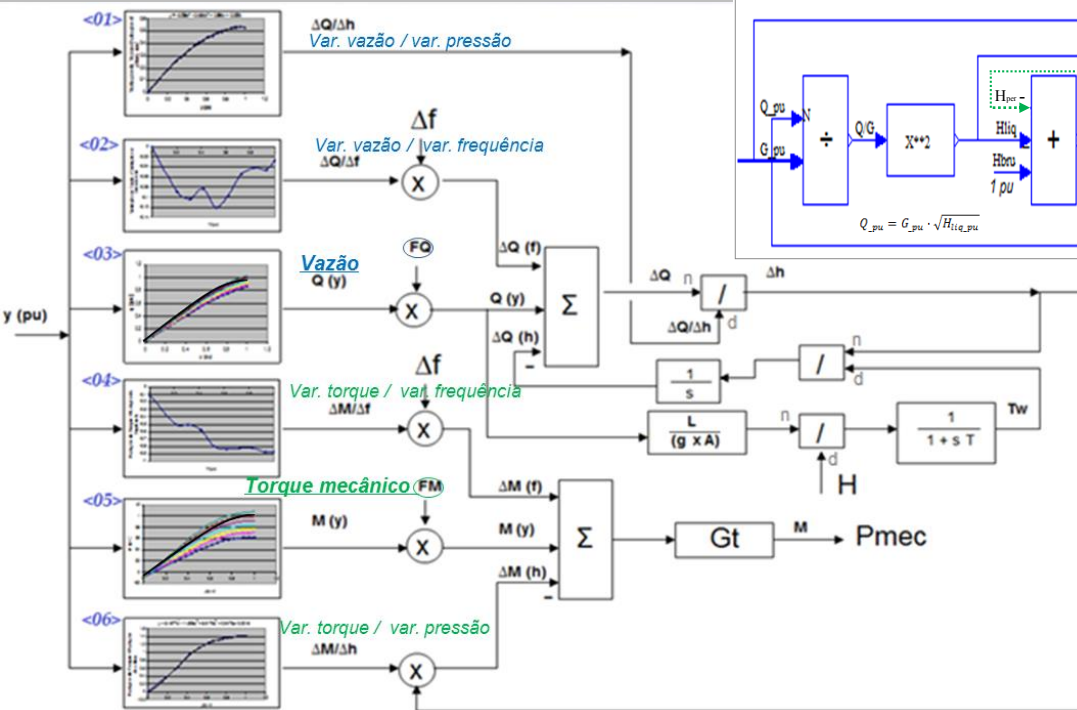
Adaptado da Dissertação de Mestrado de Marcelino P. Almeida, 1987, EFEI

MODELAGEM DINÂMICA NÃO LINEAR DE TURBINA FRANCIS A PARTIR DE DADOS DE ENSAIO DE MODELO REDUZIDO

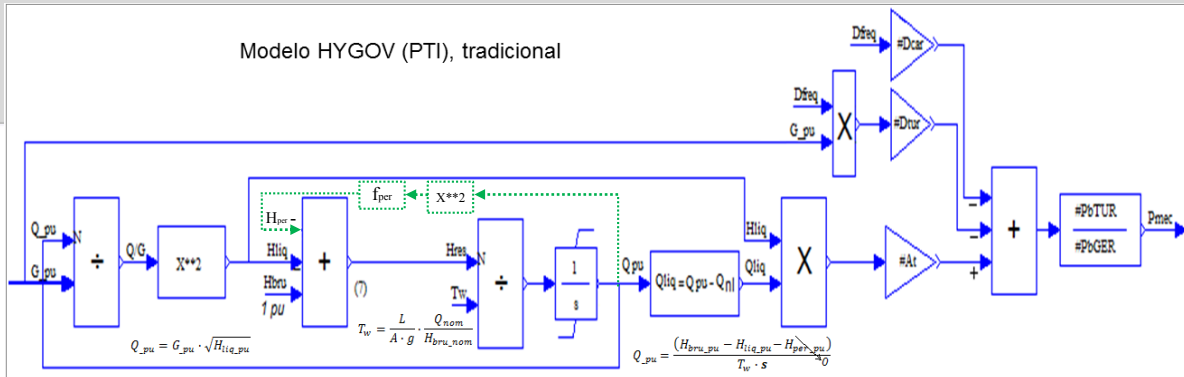
GAT 23 – Guilherme Domingues de Cerqueira

Modelo de turbina Francis

Modelo não linear de seis curvas características



Modelo HYGOV (PTI), tradicional



Modelo linear simplificado para pequenos distúrbios

