



FERREIRA FERNANDES Gabriel

Relatorio de estagio

« Desenvolvimento e aplicação de uma lei de controle em tempo real para um sistema hidraulico. »

Grenoble – FR
2020

F383d Ferreira-Fernandes, Gabriel
 Desenvolvimento e aplicação de uma lei de controle em
 tempo real para um sistema hidráulico / Gabriel
 Ferreira-Fernandes. -- Sorocaba, 2020
 3 p. : tabs., fotos

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado -
 Engenharia de Controle e Automação) - Universidade
 Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e
 Tecnologia, Sorocaba
 Orientadora: Steven Frederick Durrant

 1. Controle de sistemas hidráulicos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Agradecimento

Gostaria de agradecer ao meu supervisor de estágio, Sr. Hugo MESNAGE, por todo o apoio que ele me ofereceu. Agradeço pelo tempo passado juntos e por compartilhar sua experiência. Este estágio foi uma oportunidade muito boa para descobrir o trabalho de engenheiro de automação através de missões muito interessantes. Eu gostaria de agradecer ao Sr. Simon Bayle e a toda a Equipe Hydro PHIL para compartilhar suas experiências.

Gostaria também de agradecer ao Sr. GUILLAUME Renaud, Diretor do programa Balancing & Energy Storage, por me receber na equipe. E também o Sr. NICHELE Sylvain por me ajudar a montar o equipamento técnico no início do período de teletrabalho. E também por toda a atenção que ele me deu durante este período. De uma forma especial, gostaria de agradecer a toda a equipe da Energy Balancing & Storage pelo ambiente motivador no escritório.

Gostaria também de agradecer ao Sr. DE LA GRANDIERE Hubert, Diretor Geral do SuperGrid Institut e à Sra. MAGGIE, gerente de recursos humanos, por me receberem no Instituto SuperGrid.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), a qual financiou o intercâmbio BRAFITEC de duplo diploma entre a UNESP – Sorocaba – Sp e o Instituto INP – ENSE3 – Grenoble – FR.

Resumo

Para solucionar os novos paradigmas relacionados à integração de energias renováveis na rede elétrica, o Instituto SuperGrid desenvolve novas tecnologia dedicadas à estabilidade da rede elétrica, levando em conta a presença de fontes renováveis de energia. O Instituto SuperGrid é um instituto de pesquisa para a transição energética, sendo seu principal desafio a natureza intermitente das fontes de energia renováveis. As soluções de melhor performance são orientadas ao armazenamento de energia, entre as quais podemos citar as estações de armazenamento por bombeado (STEP). O presente manuscrito descreve em partes o processo de criação de uma plataforma, “Hydro PHIL” , destinada à reproduzir de maneira similar, o funcionamento de uma estação STEP. A finalidade da plataforma em questão é de validar as novas tecnologias antes que as mesmas sejam implementadas em uma sistema de tamanho real. Esta plataforma é o resultado de anos de pesquisa e reúne engenheiros de diferentes áreas. Do ponto de vista da automação, o foco está na modelagem de componentes hidráulicos, buscando sempre que possível utilizar um modelo simples e ao mesmo tempo eficiente. Além disso, são aplicados métodos de controle para que o sistema reaja de acordo com as especificações do projeto.

Abstract

The integration of renewable energies into the electricity grid bring new challenges to its proper operation. In order to overcome these challenges, SuperGrid Institute is involved in the development of technology to cooperate with the proper functioning of the grid. SuperGrid Institute is a research center for green energy transition. The main challenge is the intermittent nature of clean energy, which can be solved through the implementation of high-performance storage technologies. Pumped storage power plants (PSP) are the best solution for implementing advanced storage methods. This work comes to collaborate in the design of a platform capable of reproducing the behaviors of a PSP, so the new storage technologies can be validated before the implementation. This platform is the result of years of research and brings together engineers from different fields for its design. From an automation point of view, we focus on the modeling of hydraulic components, while seeking the use of a simple and at the same time efficient model. In addition, control methods are applied so that the system reacts according to the project specifications. Now we start the structural implementation phase of the platform and in parallel we improve the models and control laws of the same.

Lista de figuras

Figure 1. Exemplo de uma estação de transferência de energia por bombeamento	10
Figure 2. Plano 3D da plataforma.	11
Figure 3. Diagrama do circuito hidráulico	13
Figure 4. Ducto linear de seccao contante.	14
Figure 5. Porcentagem da queda de pressao em funcao da porcentagem da valvula anular	15
Figure 6. Vazão da bomba hidraulica am função da velocidade e da pressao.....	16
Figure 7. a) Controlador em malha aberda b) Controlador em malha fechada.....	16
Figure 8. Representação do ductos submetidos à alta pressão.....	17
Figure 9. Resposta do sistema hidraulico simplificado com $KvSp\alpha$ constante.....	19
Figure 10. Resposta do sistema simplificado com $KvSp\alpha$ variavel.....	21
Figure 11. Porcentagem de abertuda da valvula anular em função da variação de pressão	22
Figure 12. Diagrama de contrôle em malha aberta	22
Figure 13. Resposta do sistema hidraulico com contrôle em malha aberta	23
Figure 14. Pressao sobre a turbina para o sistema excitado com um sinal sinusoidal de frequencia variavel	23
Figure 15. Diagrama de bode do sistema em malha aberta	24
Figure 16. Diagrama de contrôle em malha aberta	25
Figure 17. Diagrama de bode do sistema em malha fechada.....	25
Figure 18. Referencia otimizada	26
Figure 19. Exemplo de realimentação algébrica [8]	27
Figure 20. Diagrama de Bode de um filtro de primeira ordem com frequencia de corte igual à 1 Hz.....	28
Figure 21. Modelo generico do sensor continuo.....	28
Figure 22. Modelo generico do sensor discreto.....	29
Figure 23. Diagrama de implementação do sensor.....	30
Figure 24. Parametros do sensor	30
Figure 25. Resposta do sistema com controlador em malha aberta, referencia otimisada e modelo de sensor integrado	31
Figure 26. Simulador em tempo real réel OP4510. [7].....	33
Figure 27. Concepção, Compilação e execução de um sistema em tempo real com p processador RT-LAB [7].....	33
Figure 28. a) Bloco RT-LAB para recepção de sinais de outros blocos. b) Bloco RT-LAB para comunicação analógica.....	34
Figure 29. Uso de blocos RT-LAB e comunicação entre sistemas.....	34
Figure 30. Queda de pressão ao redor da turbina durante simulação em tempo real.....	35
Figure 31. Curva característica da bomba hidraulica.....	36

Lista de símbolos

STEP	: Estação de transferência de energia por bombeamento;
Q_{VA}	: Vazão da válvula anular ;
Q_P	: Vazão da bomba;
Q_T	: Vazão da turbina ;
δh	: Perda de pressão em um tubo;
KvS	: Constante de escoamento ;
H_0	: Pressão inicial igual à 1 m ³ /s ;
Q_0	: Vazão inicial igual à 1 m ³ /s ;
t_w	: Tempo de aceleração da massa d'água em s;
t_e	: Tempo de propagação da onda de pressão ao longo da tubulação em s;
L	: Comprimento do tubo ;
a	: Velocidade de propagação da onda na tubulação ;
g	: Aceleração da gravidade.

Sumario

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	Energias renováveis	8
1.2	Supergird.....	9
1.3	Princípios do sistema STEP	10
1.4	Objetivos do projeto HYDRO PHIL.....	11
1.5	MODELISACÃO do projeto HYDRO PHILL.....	12
1.5.1	<i>Acionador.....</i>	<i>13</i>
1.5.2	<i>Ductos</i>	<i>14</i>
1.5.3	<i>Valvula anular</i>	<i>15</i>
1.5.4	<i>Bomba hidraulica.....</i>	<i>15</i>
2	CONTROLADOR.....	16
2.1	INTRODUÇÃO	16
2.2	MATERIAIS E METODOS	17
2.2.1	<i>Matlab & Simulink®.....</i>	<i>17</i>
2.2.2	<i>Sistema simplificado</i>	<i>17</i>
2.2.3	<i>Représentação de estados do sistema simplificado</i>	<i>18</i>
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
2.3.1	<i>Controle de malha aberta para o sistema simplificado.....</i>	<i>20</i>
2.3.2	<i>Controle de malha aberta para o sistema completo.....</i>	<i>21</i>
2.3.3	<i>Controle de malha fechada.....</i>	<i>23</i>
2.4	CONCLUSAO	26
3	BIBLIOTACA DE MODELOS DINAMICOS	26
3.1	INTRODUÇÃO	26
3.2	MATERIAIS E METODOS	27
3.2.1	<i>Biblioteca</i>	<i>27</i>
3.2.2	<i>Sensor continuo.....</i>	<i>27</i>
3.2.3	<i>Sensor discreto</i>	<i>29</i>
3.3	RESULTADOS E DISCUSOES	30
3.4	CONCLUSÃO	31
4	SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL	31
4.1	INTRODUÇÃO	31
4.2	MATERIAIS E METODOS	32
4.2.1	<i>OP4510.....</i>	<i>32</i>
.....
33		
4.2.2	<i>RT-Lab</i>	<i>33</i>
4.2.3	<i>Formatação do modelo Simulink®.....</i>	<i>34</i>
4.3	RESULTADOS E DISCUSOES	35
4.4	CONCLUSÃO	36

5	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS.....	36
5.1	PERPECTIVAS DO PROJETO HYDRO PHILL.....	36
5.2	FEEDBACK	37
	REFERENCIAS.....	38

1 Introdução

1.1 Energias renováveis

O uso desenfreado de combustíveis fósseis implica a liberação de poluentes diretamente ligados à qualidade do ar e à mudança climática. Além disso, o intenso consumo de recursos não renováveis leva à escassez dos mesmos. Uma demanda constantemente alta, seguida por uma oferta cada vez mais baixa, resulta em um aumento do preço desta fonte de energia. Está ficando cada vez mais claro que os combustíveis fósseis não serão capazes de atender à demanda mundial de energia no longo prazo. Neste contexto, é de grande importância estudar as fontes de energia renováveis.

Uma fonte de energia é considerada renovável quando é constantemente produzida pela natureza. A exploração deste tipo de energia resulta em uma liberação muito baixa de resíduos e poluentes [1]. Na França, as energias renováveis representam 10,7% do consumo de energia primária e 16,3% do consumo bruto final de energia [2]. Entre 1990 e 2017, a França mostrou um aumento de 70% no consumo de energia renovável. Entre as energias verdes mais utilizadas, podemos citar as hidráulicas, eólicas, fotovoltaicas, marítimas, entre outras.

O uso de energia verde resulta em uma rede elétrica mais complexa, devido à descentralização da produção de energia, e também pela natureza intermitente da energia verde logo se torna necessário investir em uma rede mais moderna. De fato, a naturalidade dessas fontes de energia perturba a previsibilidade da produção [3]. Isto torna necessária a adoção de modos avançados de armazenamento. Também deve ser levado em conta que o poder energético das fontes verdes é menor do que o das energias não renováveis [1].

Os benefícios das energias renováveis são inegáveis. Em primeiro lugar, as fontes de energia renováveis não estão sujeitas à escassez. Em segundo lugar, seu uso é expressamente menos prejudicial ao meio ambiente. Por outro lado, o armazenamento de energia desempenha um papel muito importante na implementação de energias renováveis, uma vez que as mesmas são intermitentes. O conceito de maior sucesso em termos de capacidade e volume de armazenamento é atualmente o “Pumped Storage Power Plant” (PSTP) [4].

A convergência para o uso de energia renovável é notável. Apesar de todos os desafios que este modo de produção de energia pode trazer, a promoção de uma rede moderna adaptada às necessidades atuais permitirá a boa integração das energias verdes. Neste contexto, o trabalho aqui desenvolvido contribui para este movimento em direção à energia renovável.

1.2 SuperGrid

O Instituto SuperGrid é um Instituto para Transição de Energia (ITE), em outras palavras, é um centro de pesquisa dedicado ao estudo de novas tecnologias energéticas. O objetivo da pesquisa é integrar cada vez mais as energias renováveis à rede elétrica. O Instituto SuperGrid reúne a experiência de empresas públicas e privadas, órgãos acadêmicos e laboratórios a fim de definir e conduzir programas de pesquisa [4]. Os resultados da pesquisa geram valor e contribuem para o treinamento profissional no campo da transição energética.

O Instituto SuperGrid oferece uma gama completa de tecnologias e serviços a esses clientes, que são principalmente instituições relacionadas à energia, como produtores, gerentes ou construtores. Com o objetivo de garantir o fornecimento de energia e integrar fontes renováveis de energia, o Instituto SuperGrid apóia esses clientes no desenvolvimento de sistemas de energia. A proposta de valor está focada em três áreas principais, inovação e transferência de tecnologia, plataformas de teste e consultoria. O desenvolvimento de tecnologias e serviços de valor agregado permitem a transmissão de energia em larga escala a partir de fontes renováveis, garantindo ao mesmo tempo a eficiência energética, a estabilidade e a segurança da rede.

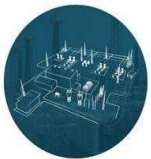
O instituto SuperGrid é composto de cinco programas com diferentes especialidades.

Arquitetura & Sistemas de Supergrid



Este programa aborda os desafios técnicos relacionados à proteção da rede DC, transformação de tensão, controle do fluxo de energia, assegurando ao mesmo tempo a coexistência de tecnologias de diferentes origens. Este cluster tem instalações de simulação em tempo real para demonstrar o desempenho de um sistema ao integrar uma nova tecnologia na rede.

Appareillage électrique haute tension



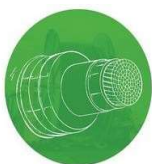
Este programa se concentra no desenvolvimento de disjuntores para atender economicamente às restrições existentes na rede DC, enquanto garante a estabilidade e disponibilidade da rede. O programa também se concentra na modelagem e otimização de sistemas de isolamento para aplicações DC, a fim de proporcionar melhor desempenho elétrico e durabilidade a longo prazo.

Electronique de Puissance & Convertisseurs



Este programa foi projetado para atender às exigências da futura rede DC, o que inclui a integração de comando de controle inovador para melhorar o desempenho; monitoramento das condições dos conversores de energia com confiabilidade e modelagem vitalícia; projeto, desenvolvimento e teste de componentes eletrônicos de alta tensão, entre outras atividades.

Systemes de Câbles & Jonctions HVDC



O programa de pesquisa abrange o estudo de materiais para construir componentes com desempenho avançado. O programa busca tecnologias específicas para se adaptar às variações no fluxo de energia da rede e modos de transição. Ele oferece uma modelagem mais precisa dos cabos HVDC, levando em conta os fenômenos físicos da corrente contínua.

Equilibrage & Stockage d'énergie



Este programa procura desenvolver instalações de armazenamento de energia para tornar a rede de energia mais responsiva à natureza intermitente da energia renovável. O objetivo é tornar a rede mais flexível através do estudo de diferentes tecnologias de armazenamento de alta eficiência e do mercado de energia. O meio mais avançado de armazenamento de energia é o STEP, porém ainda existem desafios a serem enfrentados. O meio mais avançado de armazenamento de energia é o STEP, mas ainda há desafios a serem enfrentados, portanto o programa Balancing & Energy Storage vem para garantir um comportamento mais seguro deste sistema de armazenamento, principalmente durante seqüências transitórias no modo turbina.

Le projet Hydro-PHIL fait partie du programme d'Equilibrage & Stockage d'énergie.

1.3 Principes du système STEP

As centrais elétricas de armazenamento bombeado são uma instalação que consiste em duas bacias em altitudes diferentes. Quando a demanda de eletricidade é baixa, é possível bombear água da bacia a jusante para a bacia a montante, a fim de armazenar energia a um preço reduzido. Assim que a demanda de energia aumenta e o preço é mais alto, a energia é liberada através da turbina da água na bacia superior. Desta forma, uma ETAR é lucrativa quando a diferença entre o preço de compra e venda de energia cobre os custos operacionais. A figura 1 mostra um exemplo de uma STEP.

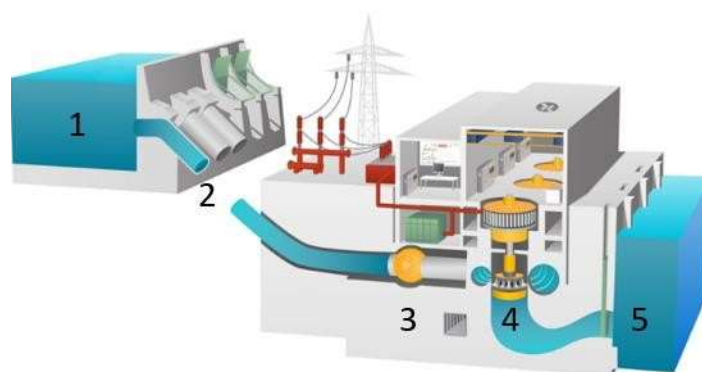


Figure 1. Exemplo geral de uma Estação de Transferência de Energia Bombeada.

Os principais elementos das obras hidráulicas estão descritos abaixo:

1. Bacia a montante: onde a água é armazenada antes da produção de energia;
2. Tubulação: um sistema de tubos concatenados para trazer a água entre a bacia a montante e a jusante;

3. Válvula anular: válvula esférica.
4. Turbina: uma máquina rotativa que produz energia mecânica a partir da água em movimento.
5. Bacia a jusante: onde a água é armazenada após a produção de energia.

A energia potencial está contida em um corpo de água localizado em altitude, em uma bacia a montante, que será levada de volta para uma bacia a jusante, entre estas duas bacias está localizada uma bomba-turbina, através da qual a energia do fluxo será convertida em energia elétrica. As ETA's têm uma boa eficiência (relação entre a eletricidade produzida e a eletricidade consumida) que está entre 70% e 85% por ciclo bomba-turbina: 1MWh consumido para armazenar água na bacia a montante permitirá a produção de 0,7 a 0,85MWh durante a turbina subsequente. [5]. A intervenção das STEPs na rede elétrica permite suavizar o preço da energia durante os picos de consumo ou de produção da mesma. Assim, as STEPs estão estreitamente ligadas à evolução dos preços da eletricidade.

1.4 Contribuição do projeto Hydro PHIL

Com o objetivo de aumentar a flexibilidade da rede elétrica, através de tecnologias avançadas de armazenamento, o projeto Hydro PHIL procura fortalecer as capacidades de demonstração e simulação em tempo real de um STEP. O Hydro PHIL é um banco de ensaio para estudar os regimes instáveis associados ao funcionamento de um sistema STEP. O projeto Hydro PHILL reproduz o comportamento de um local de produção hidráulica em relação às solicitações da rede elétrica (tensão e corrente) e da rede hidráulica (fluxo e cabeça). O plano 3D da plataforma é apresentado na Figura 2.

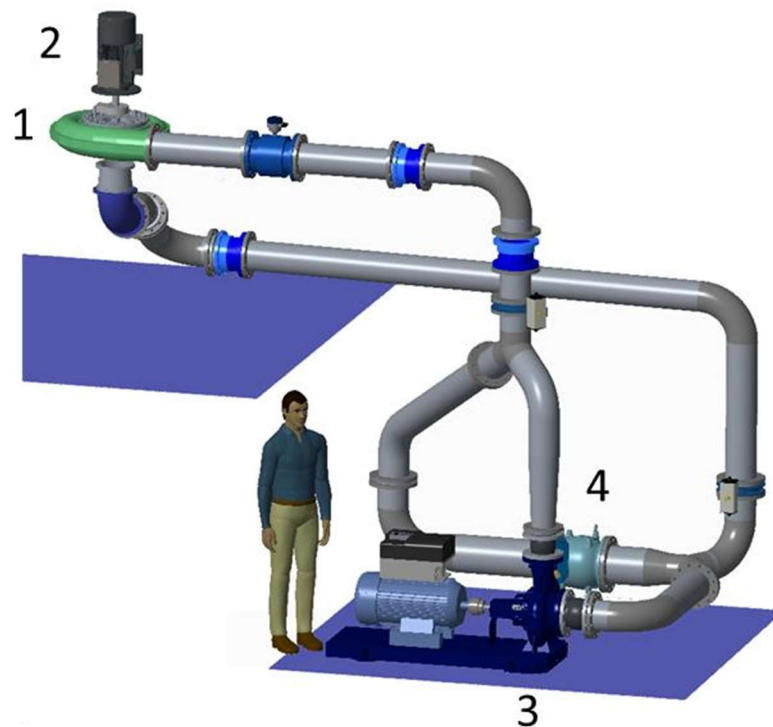


Figure 2. Plano 3D da plataforma.

A Figura 2 mostra os principais elementos de uma usina elétrica.

1. Turbina: o elemento sobre o qual o valor da pressão deve ser regulado.
2. Motor elétrico: máquina está acoplada à bomba;
3. Bomba: este elemento fornece a pressão e o fluxo normalmente fornecidos pelos tanques em uma ETAR, a bomba constitui um atuador para o sistema.
4. Válvula anular: segundo atuador para o sistema.

Além disso, a plataforma Hydro PHILL é formada por conduites e conectores.

A plataforma Hydro PHILL será implementada no Centre de Recherche et d'Essais de Machines Hydrauliques de Grenoble (CREMHYG). O CREMHYG é um laboratório do Instituto Politécnico de Grenoble (Grenoble INP). Sua missão é fazer uma contribuição científica e técnica para o desenvolvimento das turbomáquinas¹ [6].

No contexto deste estágio, a abordagem para a construção da plataforma nos leva de volta às especificações do projeto. Os principais tópicos abordados estão listados abaixo.

1. Para enriquecer a biblioteca de modelos dinâmicos dos vários componentes hidráulicos de uma estação de bombeamento-turbina;
2. 2. desenvolver as leis servo do emulador hidráulico;
3. Integrar e verificar o correto funcionamento das soluções desenvolvidas em MATLAB e Simulink® ;
4. Integrar e verificar o correto funcionamento das soluções desenvolvidas em um alvo Opal-RT em tempo real;
5. Integrar e verificar o correto funcionamento das soluções desenvolvidas sobre a plataforma de emulação hidráulica;
6. Documentar e permitir a capitalização do trabalho dentro do Instituto SuperGrid.

1.5 Modelagem do projeto Hydro PHILL

Dados estes elementos principais da plataforma Hydro PHILL, um diagrama esquemático pode ser apresentado para representa as interações entre estes elementos. A tubulação será representada pelos quatro tubos (a, b, c e d), como mostrado na Figura 3. Os reservatórios (superior e inferior) são substituídas por uma bomba, que representa a vazão e a pressão da água armazenada. A válvula anular é posicionada para permitir a regulagem da vazão e da pressão sobre a turbina. A bomba e a válvula anular são controlados através de uma referência fornecida à um atuador.

¹ Uma turbomáquina é um mecanismo no qual a energia é transferida entre uma parte rotativa (um rotor) e um fluido.

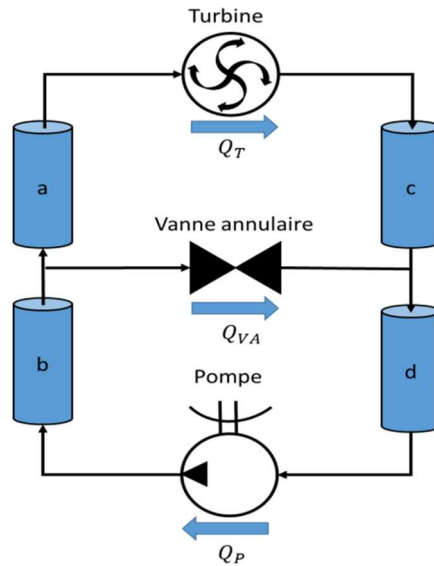


Figure 3. Diagrama de circuitos hidráulicos.

Cada um dos elementos mostrados na Figura 3 deve ser modelado a fim de reproduzir o comportamento de uma usina hidrelétrica. Um dos principais fenômenos presentes nos sistemas de STEP é o golpe de ariete. O golpe de ariete é um fenômeno de supressão que ocorre quando há uma mudança repentina na velocidade de um líquido como resultado da rápida abertura ou fechamento de uma válvula, ou quando uma bomba hidráulica é ligada ou desligada. Quanto maiores as massas de água envolvidas, maior é o golpe de ariete [3]. Analisando a Figura 3, podemos deduzir a equação (1.1). Onde Q_{VA} , Q_P e Q_T são a vazões da válvula de anel, bomba e turbina respectivamente.

$$Q_{VA} = Q_P - Q_T \quad (1.1)$$

1.5.1 Atuador

Para simplificar a dinâmica da válvula e da bomba, é considerado um atuador simplificado de acordo com a equação (1.2). Ou seja, o atuador é representado por um filtro passa-baixo de primeira ordem.

$$\frac{y}{u} = \frac{1}{1 + \tau \cdot S} \quad (1.2)$$

A constante de tempo τ está relacionada com a inércia do atuador, quanto maior τ , mais lenta é a resposta y do atuador, mais um atuador lento requer métodos de controle mais eficientes. No sistema hidráulico, é necessário um atuador para a válvula anular e um segundo para controlar a velocidade da bomba hidráulica.

1.5.2 Ductos

Como o golpe de ariete é um fenômeno relacionado à dinâmica do fluido que flui nas tubulações, tentamos modelizar este componente, levando em conta o fenômeno em questão. A seguir, consideramos um tubo linear com seção constante, como mostrado na Figura 4.

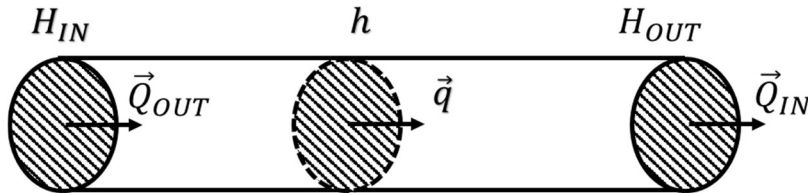


Figure 4. Tubo linear com seção transversal constante.

A lei de conservação da massa e a lei de conservação do movimento, levam à lei que rege o comportamento da pressão $h(x, t)$ e da vazão $q(x, t)$ na seção x e tempo t , como apresentado no sistema de equações (1.3) [3]. Onde $F = f$, sendo f um coeficiente de atrito de 2.S.D fluido no tubo; S a seção transversal do tubo em m^2 ; D o diâmetro do tubo; α e β são constantes.

$$\begin{cases} \alpha \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \\ \beta \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = -F \cdot q(x, t) |q(x, t)| \end{cases} \quad (1.3)$$

O sistema de equações diferenciais parciais (1.3) foi resolvido através do método de características na tese "Modelagem e controle avançado para turbinas de cabeça média e alta", escrita por Hugo MESNAGE. No trabalho aqui apresentado, nos concentramos na solução deste sistema, que é exposto em equações (1,4) e (1,5).

$$(H_{OUT}(t) + H_{loss}(t)) = -k \cdot (Q_{IN}(t) - Q_{IN}(t - \Delta)) + (2 - C_{loss}) \cdot H_{IN} \left(t - \frac{\Delta}{2} \right) - (1 - C_{loss}) \cdot (H_{OUT}(t - \Delta) + H_{loss}(t - \Delta)) \quad (1.4)$$

$$Q_{OUT}(t) = \frac{1}{k} \cdot (H_{IN}(t) - H_{IN}(t - \Delta)) + (2 - C_{loss}) Q_{IN} \left(t - \frac{\Delta}{2} \right) - (1 - C_{loss}) \cdot Q_{OUT}(t - \Delta) \quad (1.5)$$

As equações (1,4) e (1,5) são usadas para analisar o comportamento dinâmico das tubulações. Onde C_{loss} é um termo de dissipação que leva em conta as perdas de cargas relacionadas à fricção na tubulação.

1.5.3 Válvula anular

A equação (1,6) expressa a queda na válvula do anel, onde KvS é a taxa de vazamento da válvula, este coeficiente define a taxa de vazão de água através do membro. Na Figura 5, é apresentada a função $KvSp(\alpha)$, que expressa a porcentagem de perda de cabeça em função da porcentagem da abertura da válvula anular (α).

$$\delta h = 10,19 \cdot \left(\frac{3600 \cdot Q_{VA}}{KvSp(\alpha) \cdot \frac{KvS}{100}} \right)^2 \quad (1.6)$$

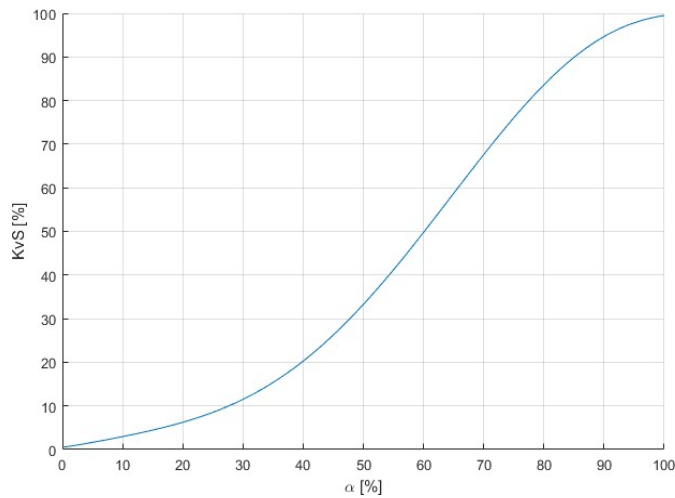


Figure 5. Função da porcentagem da queda de pressão em função da porcentagem da abertura da válvula

1.5.4 Bomba hidráulica

A vazão da bomba hidráulica (Q_p) é dada pela equação (1,7). Onde δh_P é a queda na bomba e VP é a velocidade da bomba.

$$Q_p = \frac{f_{onc}(\delta h_P, VP)}{3600} \quad (1.7)$$

O gráfico da função tridimensional $fonc(\delta hP, VP)$ é mostrado na Figura 6.

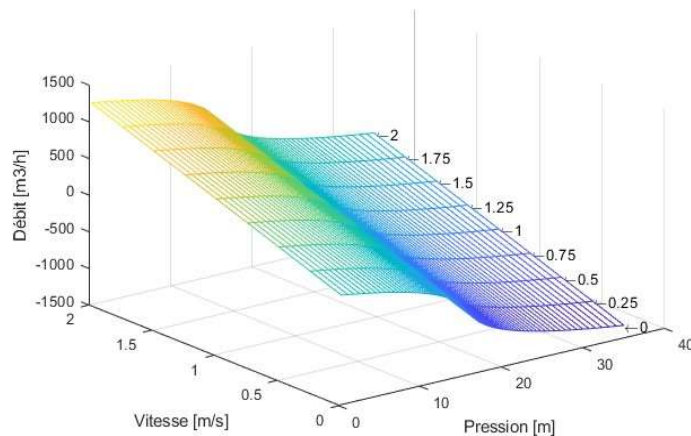


Figure 6. Vazão da bomba em função da velocidade e da pressão na bomba.

Note que a pressão na bomba é dada por metro de coluna de água.

2 CONTROLADOR

2.1 Introduction

Os métodos de controle estão preocupados com o comportamento dinâmico dos sistemas em função de seus parâmetros [7]. Um controlador é uma estratégia para fornecer a entrada correta ao modelo, a fim de obter uma saída que corresponda às especificações do sistema. Na ausência de uma medição da saída do sistema, ele é referido como um controlador de circuito aberto (OL), como mostrado na Figura 7.a). Uma vez disponível um loop de feedback, ele é referido como um controlador de circuito fechado (CL). O feedback pode ter um ganho unitário k , ou um valor diferente de um.

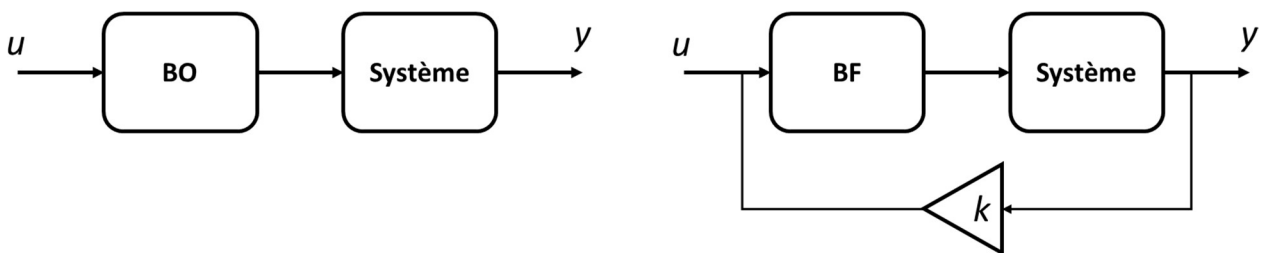


Figure 7. a) Contrôleur boucle ouverte

b) Contrôleur boucle fermée.

Diferentes tipos de controladores de circuito fechado são encontrados na literatura, porém neste projeto nos concentramos no controlador proporcional-integral-derivativo, mais conhecido como PID. Este controlador permite melhorar o desempenho de um sistema controlado através do ajuste de três parâmetros. Em alguns casos, é possível implementar variações deste controlador, por exemplo, o controlador P, I, PD ou PI.

2.2 Matériel et Méthodes

2.2.1 Matlab & Simulink®

MATLAB® é um software que permite a expressão de fórmulas algébricas em forma tabular ou matricial. Possui uma grande biblioteca de ferramentas totalmente documentadas, permitindo a criação de algoritmos profissionais poderosos. MATLAB® é capaz de realizar vários processos interativos para otimizar o resultado e também para realizar a automação de processos.

Usando MATLAB® & Simulink® você pode combinar programação de texto e gráfica para projetar seu sistema em um ambiente de simulação [8]. O Simulink® facilita o projeto e a simulação de sistemas complexos. Possui uma ampla gama de ferramentas de modelagem, o que permite a análise do comportamento de diferentes modelos físicos. A simulação é um passo muito importante em qualquer projeto de desenvolvimento de sistema. Reduz o custo de um protótipo mal idealizado, já que a simulação permite validar um modelo físico antes que ele seja projetado. Além disso, a simulação permite que o sistema esteja sujeito a condições muito arriscadas para ser realizado no modelo físico.

2.2.2 Sistema simplificado

A fim de propor um controlador para o sistema que constitui o modelo de simulação da plataforma Hydro PHILL, nos concentramos em um sistema reduzido que replica as características estáticas e dinâmicas do circuito hidráulico. As canetas são responsáveis pelo caráter dinâmico, e a bomba e a válvula pelo caráter estático. A figura 8 mostra o modelo reduzido do circuito hidráulico, no qual tentamos regular a queda na borda da turbina. Este diagrama corresponde ao lado de alta pressão do sistema, onde as linhas "a" e "b" estão localizadas.

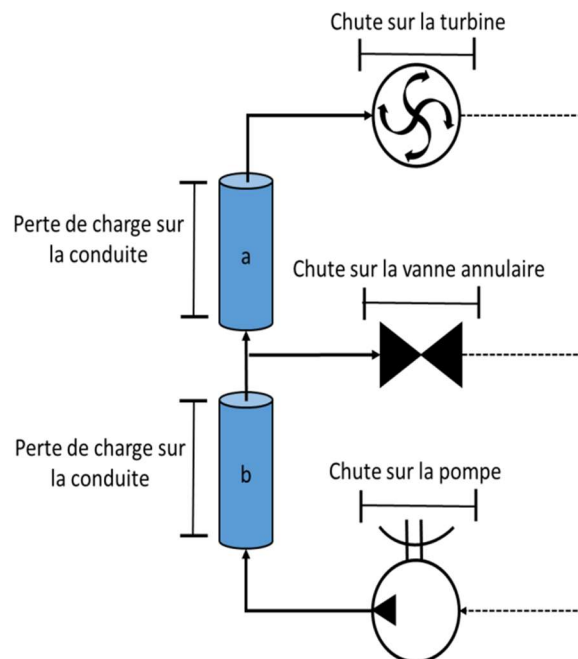


Figure 8. Tubulações submetidas a alta pressão.

A bomba e a válvula anular são usadas para regular a queda e a vazão na borda da turbina. A vazão da bomba pode ser variada e também o ângulo de abertura da válvula anular pode ser controlado. Pode-se ver que o efeito dos atuadores é negligenciado no circuito reduzido. A fim de realizar uma análise sobre nosso sistema reduzido, introduzimos a primeira equação de ordem (2.1) para representar a dinâmica da tubulação [3]. Esta equação informa a queda de pressão ∂h na tubulação para uma variação da vazão dada por ∂Q .

$$\frac{\delta h(S)}{\partial Q} = -\frac{H_0}{Q_0} \cdot \frac{t_w}{t_e} \cdot \frac{t_e \cdot S}{1 + t_e} \quad (2.1)$$

$t_w = \frac{Q_0}{H_0} \cdot \frac{L}{g \cdot S}$ Onde H_0 e Q_0 são, respectivamente, a pressão e vazão de valor unitario ;

$t_e = \frac{L}{a}$ est le temps de propagation des ondes de pression le long de la conduite en s;

L é o comprimento do tubo;

a é a velocidade de propagação da onda ao longo do tubo;

g é a aceleração da gravidade.

A equação (1.6) informa que a pressão sobre a válvula anular é diretamente proporcional a Q_2 e inversamente proporcional a $KvSp$. Portanto, de forma simplificada, consideramos que a pressão sobre a válvula anular é dada pela equação (2.2). Presume-se que todos os ganhos expressos numericamente na equação (1,6) estão incluídos na função $KvSp(\alpha)$ na equação (2,2).

2.2.3 Representação de estados do sistema reduzido

A fim de projetar uma representação estatal a variável estatal x apresentada na equação (2.3) [3] é escolhida. Em seguida, a representação estatal é apresentada no sistema de equação (2.4). As variáveis com a letra "a" subscrita referem-se ao tubo "a

$$\begin{cases} \dot{x}_a = \frac{-1}{t_{ea}} \cdot x_a + \frac{t_{wa}}{t_{ea}} \cdot Q_T \\ \partial h_a = \frac{1}{t_{ea}} \cdot x_a - \frac{t_{wa}}{t_{ea}} \cdot Q_T \end{cases} \quad (2.4)$$

Note que estamos interessados na variação de pressão na borda da turbina, porém a saída deste sistema é dada pela equação (2,5). Observamos que a variação de pressão na turbina é uma função do fluxo da bomba e do fluxo da própria turbina, assim como uma função da posição da válvula do anel e da variável de estado x_a .

$$H_T = \frac{Q_{VA}^2}{KvSp_p(\alpha)^2} + \frac{1}{t_{ea}} \cdot x_a - \frac{t_{wa}}{t_{ea}} \cdot Q_T \quad (2.5)$$

x_a e o vetor apresentado na equação (2,6).

$$u = \begin{bmatrix} Q_T \\ Q_P \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_a = \frac{-1}{t_{ea}} \cdot x_a + \begin{bmatrix} -\frac{t_{wa}}{t_{ea}} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u \\ H_T = \frac{Q_{VA}^2}{(KvSp_p(\alpha))^2} + \frac{1}{t_{ea}} \cdot x_a + \begin{bmatrix} -\frac{t_{wa}}{t_{ea}} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u \end{cases} \quad (2.7)$$

Na representação de estados da equação (2,7), notamos que o valor de QVA é dado pelo fluxo da turbina menos o fluxo da bomba, como antes apresentado na equação (1,1). Em um primeiro momento consideramos um valor constante para $KvSp(\alpha)$, ou seja, a válvula anular não será usada para regular a queda de pressão na turbina. Esse resultado é apresentado na Figura 9.

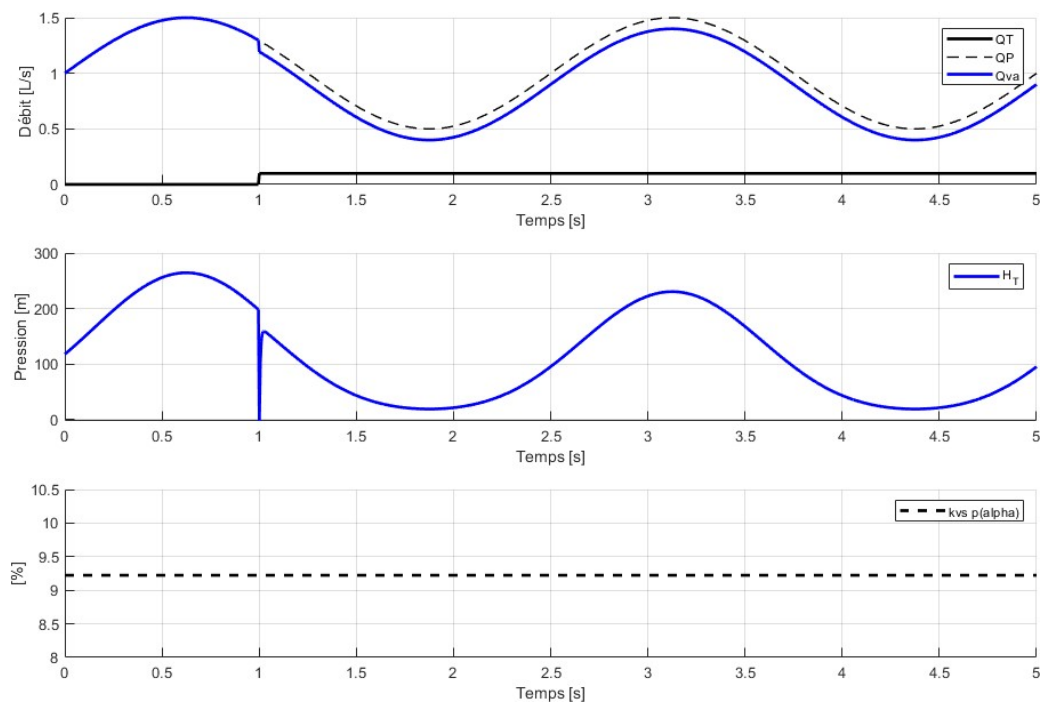


Figure 9. Resposta do sistema simplificado com $KvSp(\alpha)$ constante.

Pode-se observar que a queda na pressão da turbina (HT) varia de acordo com a vazão provida pela bomba (QP). Além disso, no momento igual à 1 segundo, uma perturbação é aplicada no fluxo da turbina (QT), esta variação de fluxo gera uma supressão no sistema, o que caracteriza o fenômeno golpe de Ariete.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Controlador em malha aberta do sistema reduzido

A fim de controlar a queda de pressão na turbina, procuramos $KvSp(\alpha)$ tal que $\lim_{t \rightarrow \infty} H_T \rightarrow H_{ref}$. Assim, esperamos que o erro entre HT e H_{ref} seja zero quando t tende ao infinito. Entretanto, ao substituir HT apresentado na equação (2,5) na equação (2,8) obtem-se a equação (2,9).

$$erreur = H_T^{ref} - H_T = 0 \tag{2.8}$$

$$KvS_p(\alpha) = \frac{Q_P - Q_T}{H_T^{ref} - \frac{1}{t_{ea}} \cdot x_a - d_a \cdot Q_T} \tag{2.9}$$

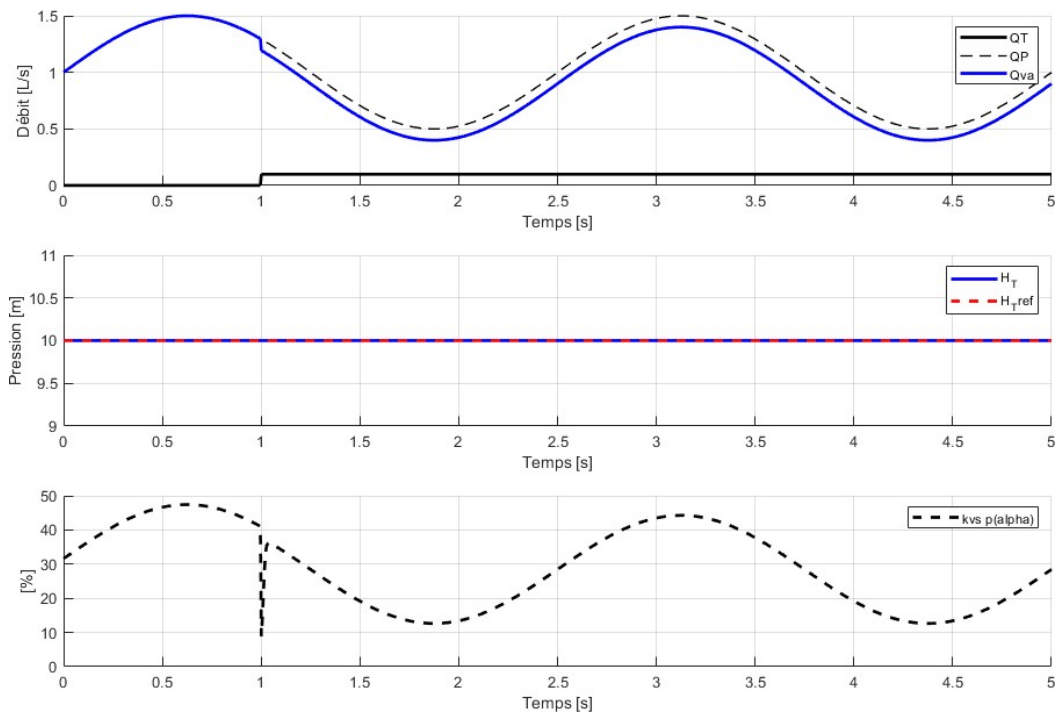


Figure 10. Resposta do sistema simplificado com $KvSp(\alpha)$ variável.

Usando a equação (2,9) para expressar o valor de $KvSp(\alpha)$ na representação estatal (2,7), com $Href = 10$, obtemos o resultado mostrado na Figure 10.

Neste caso, pode-se ver que a queda na borda da turbina (HT) é constante. Como pode ser visto na Figura 10, o valor de $KvSp(\alpha)$ varia de forma a compensar a variação da pressão no sistema. Em conclusão, somos capazes de controlar a queda na turbina, do circuito hidráulico reduzido, através da abertura da válvula anular.

2.3.2 Controle de loop aberto em todo o sistema

Uma vez que se possa regular a cabeça na borda da turbina com o circuito reduzido, pode-se aplicar a mesma abordagem ao modelo do sistema hidráulico completo. Enquanto o sistema reduzido considera apenas dois tubos simplificados, o sistema completo é composto por quatro tubos, como mostrado na Figura 3, e a dinâmica dos tubos é dada por equações (1,4) e (1,5), o que torna o sistema mais complexo. Além disso, consideramos todos os ganhos expressos na equação (1,6) para derivar a equação (2,10), sobre a qual expressamos $KvSp$ tal que $\lim_{t \rightarrow \infty} Ht \rightarrow Href$.

$$KvSp_p = \frac{3600 \cdot Q_{VA}}{\frac{KvS}{100} \cdot \sqrt{\frac{H_T^{ref}}{10,19}}} \quad (2.10)$$

A seguir, invertemos a função $KvSp(\alpha)$, para obter a função mostrada na Figura 11. (O gráfico de $KvSp(\alpha)$ foi apresentado na Figura 5). Desta forma, é possível deduzir o valor de α em função de KvS_p .

Finalmente, de forma simplificada, o esquema de controle em circuito aberto é apresentado na Figura 12.

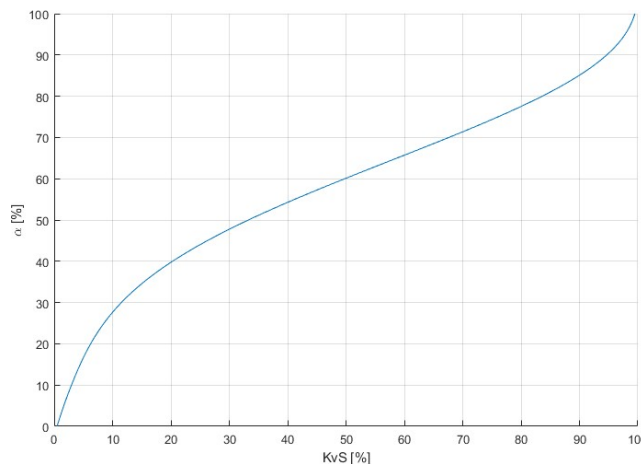


Figure 11. Função da porcentagem de abertura da válvula anular em função da porcentagem de queda de pressão.

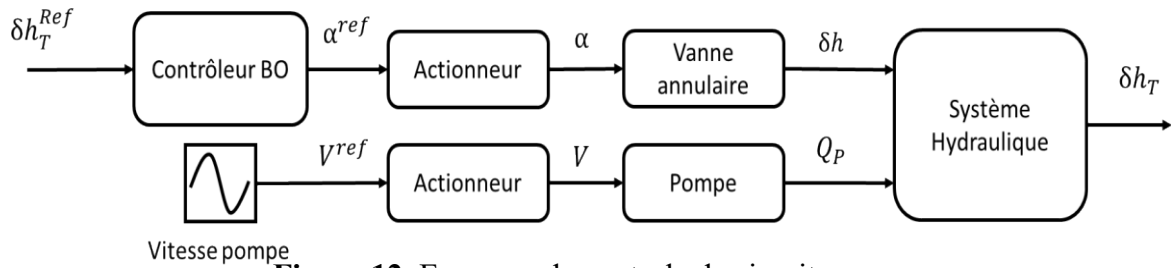


Figure 12. Esquema de controle de circuito aberto.

Vale ressaltar que a queda de pressão na válvula anular é uma função da porcentagem de abertura da válvula anular. Mas, na realidade, ela também leva em conta a vazão da bomba e da turbina, o que não é mostrado no diagrama. Também resalta-se que a vazão da bomba é controlada através da variação de velocidade da mesma. A simulação do diagrama completo em malha aberta resulta na Figura 13.

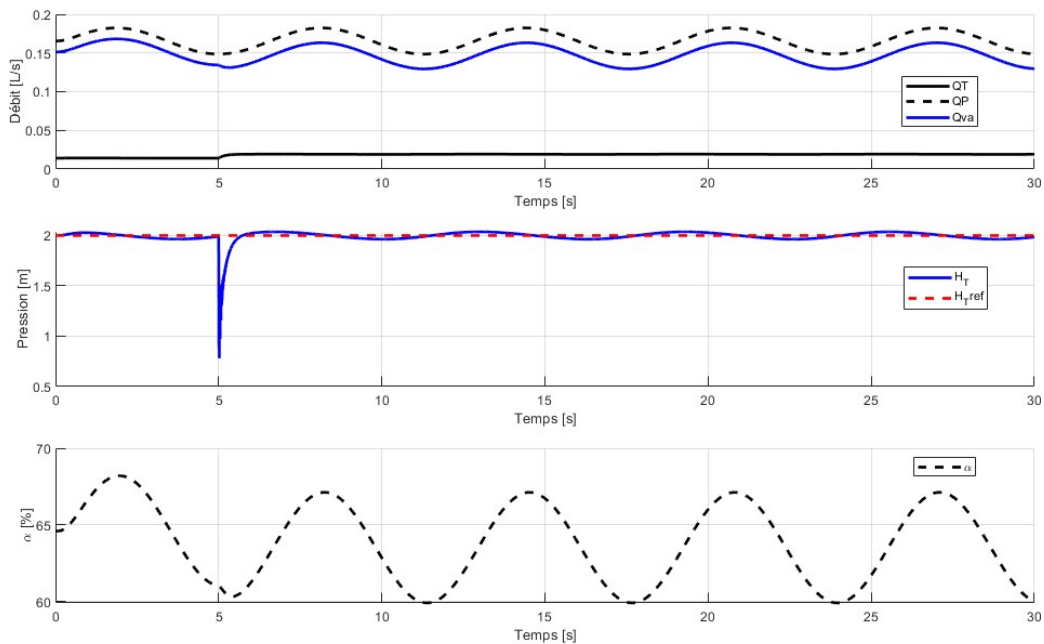


Figure 13. Resposta do sistema hidráulico com controlador de circuito aberto.

Como pode ser visto na Figura 13, a abertura da válvula anular varia a fim de compensar a queda de pressão da turbina. Entretanto, ainda tem-se uma pequena oscilação da queda H_T . Isto se deve à velocidade de resposta dos atuadores. Em um caso hipotético, onde os atuadores são negligenciados considera-se que a velocidade da resposta dos mesmo é suficientemente alta para seguir a referencia com precisão. Entretanto, o efeito do golpe de Ariete estará sempre presente em um modelo que reproduz com precisão o comportamento de um circuito hidráulico.

2.3.3 Controlador de circuito fechado

Ao analisar um sistema hidráulico no domínio da frequência, pode-se ver que os fenômenos característicos de um circuito hidráulico são expressos entre 0 e 10 Hz. Como a plataforma Hydro PHILL é um meio de simular fielmente um sistema STEP, procuramos ser sensíveis a estes fenômenos. A fim de identificar a largura de banda do sistema com o controlador de circuito aberto, é fornecido um seno varrido de banda de frequência ampla como setpoint H_{ref} . Este seno cobre a faixa de frequência

Esta onda sinusoidal cobre a faixa de frequência de 0 a 20 Hz e é mostrada na Figura 14.

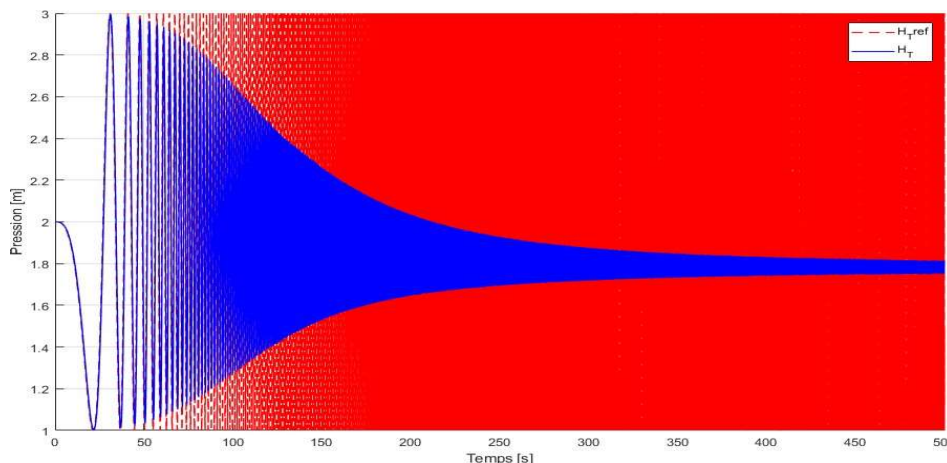


Figure 14. Resposta do sistema ao ser excitado por um sinal sinusoidal de frequência variavel.

A resposta HT é analisada com mais detalhes a seguir. Considerando a entrada sinusoidal e a saída HT do sistema podemos utilizar a função "etfe" no Matlab®, para estimar a função de transferência empírica do sistema. Finalmente, chegamos ao diagrama de bode mostrado na Figura 15.

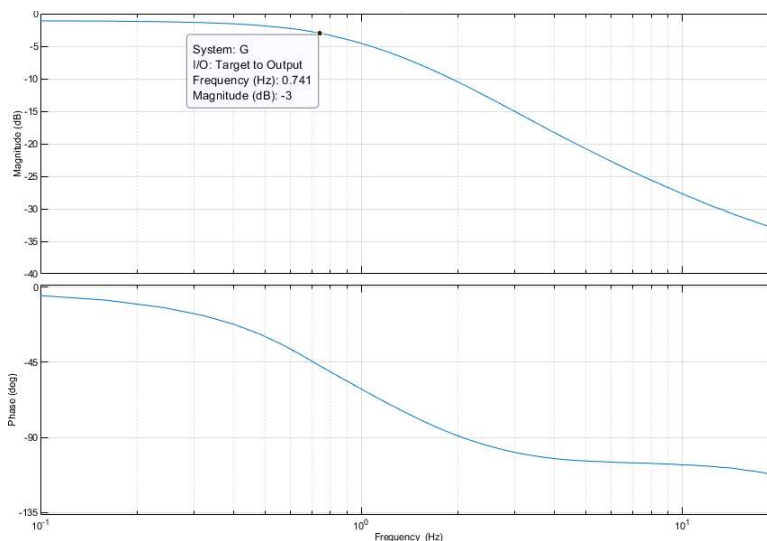


Figure 15. Diagrama de bode do sistema em malha aberta.

Pode-se observar que a -3 dB tem-se uma frequência de corte de 0,741 Hz, o que significa que os fenômenos que ocorrem em uma faixa de frequência acima de 0,741 Hz serão atenuados e o sistema será insensível a estes fenômenos. Assim, em circuito aberto, o sistema hidráulico não é capaz de esperar pela largura de banda desejada de 10 Hz. A fim de superar este inconveniente, é proposta a implementação de um controlador PI discreto de circuito fechado.

É desejável que o sistema hidráulico responda como um sistema de segunda ordem com uma frequência de corte de aproximadamente 10 Hz. Uma pequena mudança na resposta deste sistema pode ser tolerada. Portanto, é idealizado que a função de transferência em circuito fechado seja dada por equação (2.11), onde $\zeta = 0,7$, $\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot 10 \text{ rad}$ e $K = 1$.

$$\frac{K}{1 + \frac{2 \cdot \zeta}{\omega_n} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_n^2}} \quad (2.11)$$

Em um primeiro passo, uma aproximação é considerada, onde a função de transferência do sistema hidráulico é representada pela equação (2.1), que expressa a perda de cabeça em um tubo. Como a equação (2.1) é contínua, ela é discretizada, conforme apresentado no Anexo I. Além disso, a PI discreta é apresentada em equação (2.13). Onde P é o ganho proporcional e I o ganho integral do controlado.

$$(z - z_1) \cdot (z - z_2) \quad (2.12)$$

$$P + \frac{I \cdot T_e}{z + 1} \quad (2.13)$$

Uma vez que temos uma função aproximada de transferência discreta do sistema e a arquitetura do controlador PI discreto, somos capazes de encontrar o polinômio característico do sistema de circuito fechado. Então, o polinômio característico do sistema de ciclo fechado é comparado com a equação (2.12), a fim de derivar os valores dos ganhos P e I . O loop de controle é apresentado de forma simplificada em Figure 16.

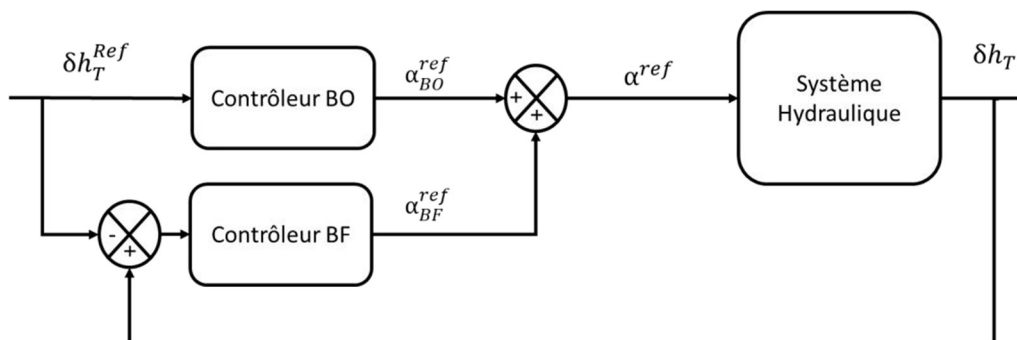


Figure 16. Esquema de controle de circuito fechado.

O procedimento é repetido para observar a largura de banda do sistema em malha fechada. Para este fim, o mesmo seno varrido é usado como o setpoint H_{ref} . Após estimar a função de transferência do sistema de circuito fechado através da função "etfe" em Matlab®, podemos obter o diagrama de bode mostrado na Figure 17.

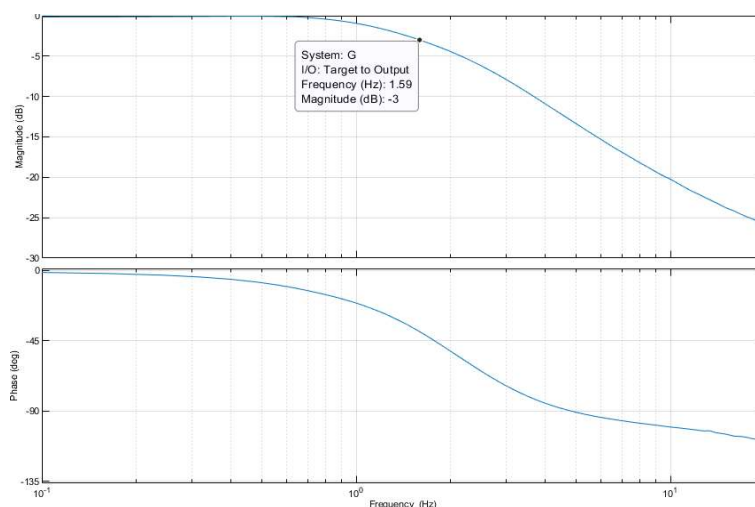


Figure 17. Diagrama de bode do sistema em malha fechada.

Pode-se ver que a frequência de corte obtida corresponde a 1,59 Hz. Na verdade, conseguimos aumentar a largura de banda do sistema, mas ela não corresponde à esperada. Portanto, com este método de ajuste da PI, não conseguimos obter o resultado desejado. Um dos pontos a serem revisados é a equação simplificada utilizada como função de transferência, pois se esta equação for muito simplificada em relação ao sistema real, não será possível utilizá-la, a fim de obter uma frequência de corte de cerca de 10 Hz.

2.4 Conclusão

Nesta seção, é apresentada uma proposta para o controle da queda d'água na borda da turbina da plataforma Hydro PHILL através de um controlador de circuito aberto. O sistema em questão é composto por vários elementos não lineares com forte interação entre eles, o que dá um caráter realista à plataforma hidráulica. Apesar da complexidade do sistema, foi possível projetar uma solução que contribui para o bom funcionamento do circuito. Entretanto, a fim de alcançar a largura de banda desejada de 10 Hz, outros métodos de ajuste da PI serão experimentados, bem como outros tipos de controladores.

3 Biblioteca de modelos dinâmicos

3.1 Introdução

A fim de dar continuidade ao projeto Hydro PHILL, os diferentes componentes que integrarão a biblioteca de elementos hidráulicos utilizados no sistema estão sendo modelados. Estes componentes trarão uma característica mais realista para a simulação. A figura 18 mostra a relação entre o simulador da usina, o controlador e o circuito hidráulico.

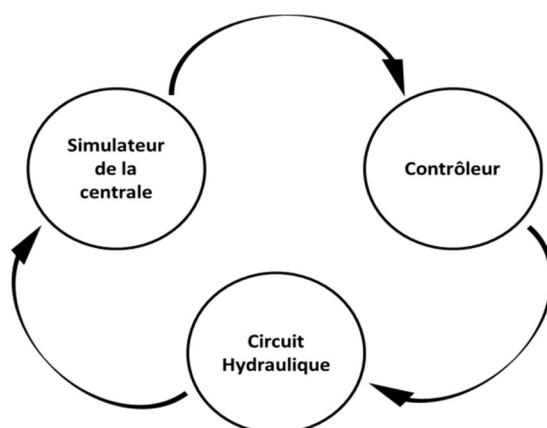


Figure 18. Interação entre os diferentes componentes.

O simulador da usina gera uma referência mais realista, para que o controlador possa controlar o sistema hidráulico de acordo com esta referência. O simulador leva em conta as medidas do circuito hidráulico para gerar um ponto de ajuste consistente. Estas medidas são obtidas através de três tipos diferentes de sensores. Entretanto, o objetivo é projetar modelos dos sensores, a fim de antecipar o impacto que tal componente pode ter sobre o sistema.

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Biblioteca de elementos

Nessa sessão nos concentramos principalmente na possibilidade oferecida em Matlab de gerar uma biblioteca pessoal. Através de uma biblioteca pessoal, somos capazes de salvar os componentes modelados, para que possamos usá-los em nosso sistema. Além disso, as atualizações feitas em um modelo de uma biblioteca Simulink® são automaticamente transferidas para todos os modelos associados a essa biblioteca.

Por exemplo, um elemento que nos interessa na modelagem é um "Loop Breaker", que é responsável pela solução de possíveis problemas com um loop algébrico. Em um modelo Simulink®, um loop algébrico é quando um bloco depende de sua entrada e sua saída ao mesmo tempo para gerar uma saída, como mostrado na Figura 19.

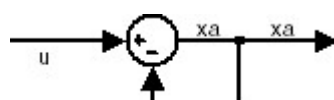


Figure 19. Exemplo de um laço algébrico [8].

A equação (3.1) apresenta um disjuntor algébrico. Onde K é um ganho unitário, T_s é o período de amostragem, y é a saída e u é a entrada.

$$y = G.(u - y) \cdot \frac{K.Ts}{z - 1} \quad (3.1)$$

O que quebra o loop algébrico é o estado inicial do integrador, ou seja $y_0 = x_0$ sendo x_0 um estado inicial definido a priori..

3.2.2 Sensor contínuo

Na plataforma haverá três tipos de sensores, um sensor de fluxo, um sensor de pressão e um sensor de velocidade. Os sensores serão modelados de forma geral de acordo com a equação (3.2). Um filtro e um ganho são aplicados no sinal de entrada x , depois um viés e um ruído branco são adicionados no resultado para frente, além disso a saída do sensor está sujeita a um atraso T_0 definido como um parâmetro.

$$y = (x \cdot \text{Filtre} \cdot \text{Gain} + \text{Bias} + \text{Bruit})(t - T_0(t)) \quad (3.2)$$

O filtro contínuo é modelado no domínio Laplace de acordo com a equação (3.3), onde fc é a frequência de corte do filtro.

$$\text{Filtre}(s) = \frac{1}{\frac{s}{2\pi \cdot fc} + 1} \quad (3.3)$$

Se analisarmos o filtro com uma frequência de corte de 1 Hz obtemos o diagrama de Bode mostrado na Figura 20. Observamos que em -3 dB a frequência corresponde bem a $2 \cdot \pi \text{ ras/s}$, que corresponde a 1 Hz .

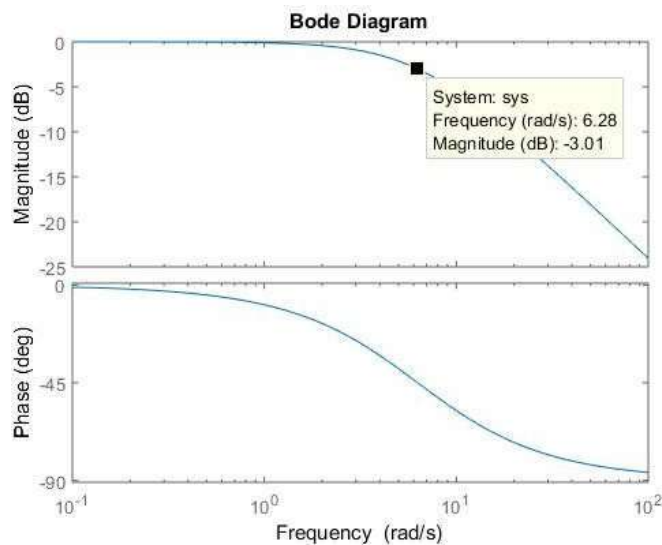


Figure 20. Diagrama de bode de um filtro de primeira ordem com uma frequência de corte de 1 Hz .

Os valores de frequência de corte, amplitude de ruído e polarização são escolhidos de acordo com a documentação técnica de cada sensor. O modelo genérico de sensor faz parte da biblioteca de elementos e tem uma máscara para identificar cada parâmetro do modelo. O modelo Simulink® do

sensor contínuo é mostrado na Figura 21.

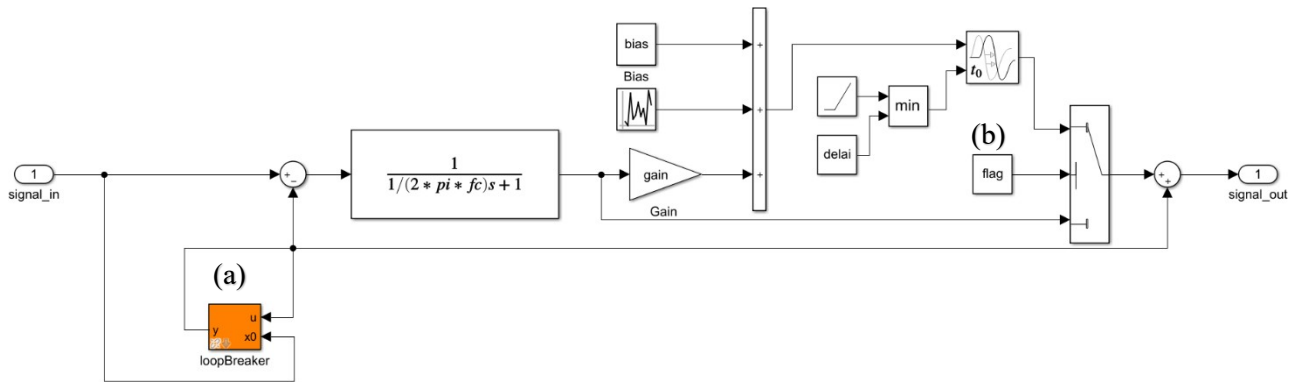


Figure 21. Modelo genérico do sensor contínuo.

No modelo mostrado na Figura 21, podemos ver o bloco "Loop Breaker" designado pela letra (a). Neste caso, este bloco foi utilizado para administrar o estado inicial do sistema. Na verdade, o estado inicial do sistema é preservado adicionando-o à saída, ao mesmo tempo em que é cancelado na entrada. Observamos também a presença de uma "bandeira" indicada pela letra (b), esta variável torna possível ativar ou desativar o efeito de perturbações no sinal, se o valor da "bandeira" for igual a 1, as perturbações são ativadas, se 0, não há perturbação. Os distúrbios são chamados de ganho, ruído branco e preconceito.

3.2.3 Sensor discreto

Há também uma versão discreta do modelo do sensor, na qual um filtro discreto é implementado, como mostrado na equação (3.4), onde T_e é o período de amostragem.

$$Filtre(Z) = \frac{1 - e^{(-2.\pi.T_e.fc)}}{z - e^{(-2.\pi.T_e.fc)}} \quad (3.4)$$

A Figura 22 mostra o modelo de sensor discreto.

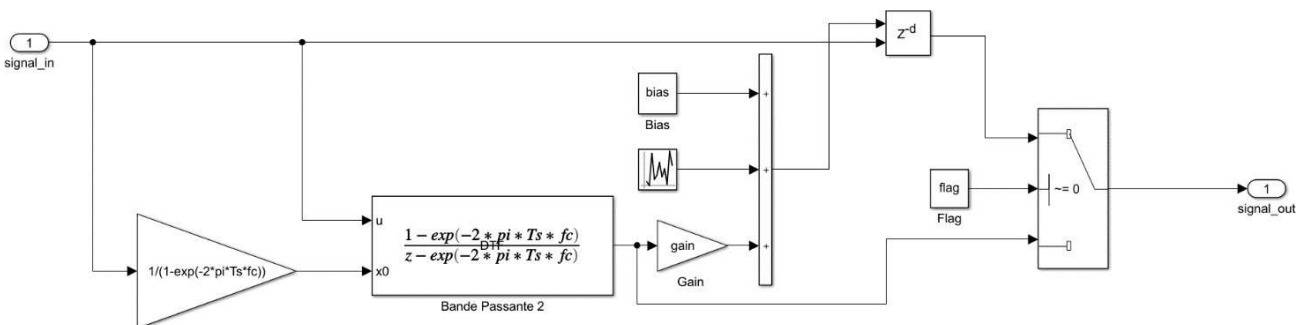


Figure 22. Modelo genérico de sensor discreto.

Neste caso, o bloco discreto tem a opção de adicionar uma entrada externa para definir um estado inicial para o sistema. Entretanto, foi necessário aplicar um ganho ao estado inicial para que ele estivesse na escala correta. Este ganho é apresentado em equação (3,5).

$$gain = \frac{1}{1 - e^{(-2.\pi.T_e.fc)}} \quad (3.5)$$

3.3 Resultados e discussão

Os sensores são implementados no sistema como mostrado no diagrama simplificado na Figura 23. Na verdade, o controlador de circuito aberto tem como parâmetros as medidas originais do sistema hidráulico, e como entrada o set point gerado pelo simulador da usina de energia hidráulica. O controlador de circuito fechado foi omitido neste diagrama.

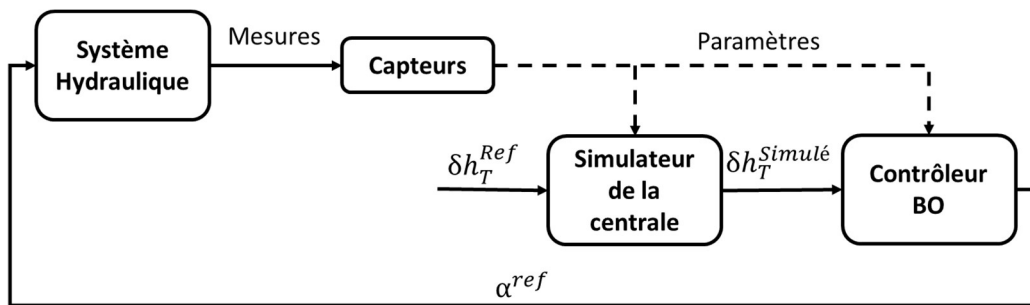


Figure 23. Diagrama simplificado de implementação de sensores.

São feitas diferentes medições no sistema hidráulico, através de seis sensores: um medidor de fluxo; um sensor de velocidade; e quatro sensores de pressão. Inicialmente, todos os sensores serão ajustados com os mesmos parâmetros mostrados na Figura 24.

Parametro	Valor
Frequencia de corte [Hz]	1
Ruido	0.0005
Bias	0.0005
Ganho	1
Ts [s]	1.00E-03
Delay	1
Flag	1

Figure 24. Parâmetros do modelo do sensor.

A resposta do sistema hidráulico é mostrada na Figura 25. Como antes, a abertura da válvula anular varia de modo a manter constante a pressão na borda da turbina. Entretanto, pode-se ver que, devido ao tempo de resposta dos acionistas, pode haver uma oscilação da cabeça na turbina. Também notamos que a pressão da turbina está mais próxima da sua referencia, a qual é gerada através do modelo da central STEP.

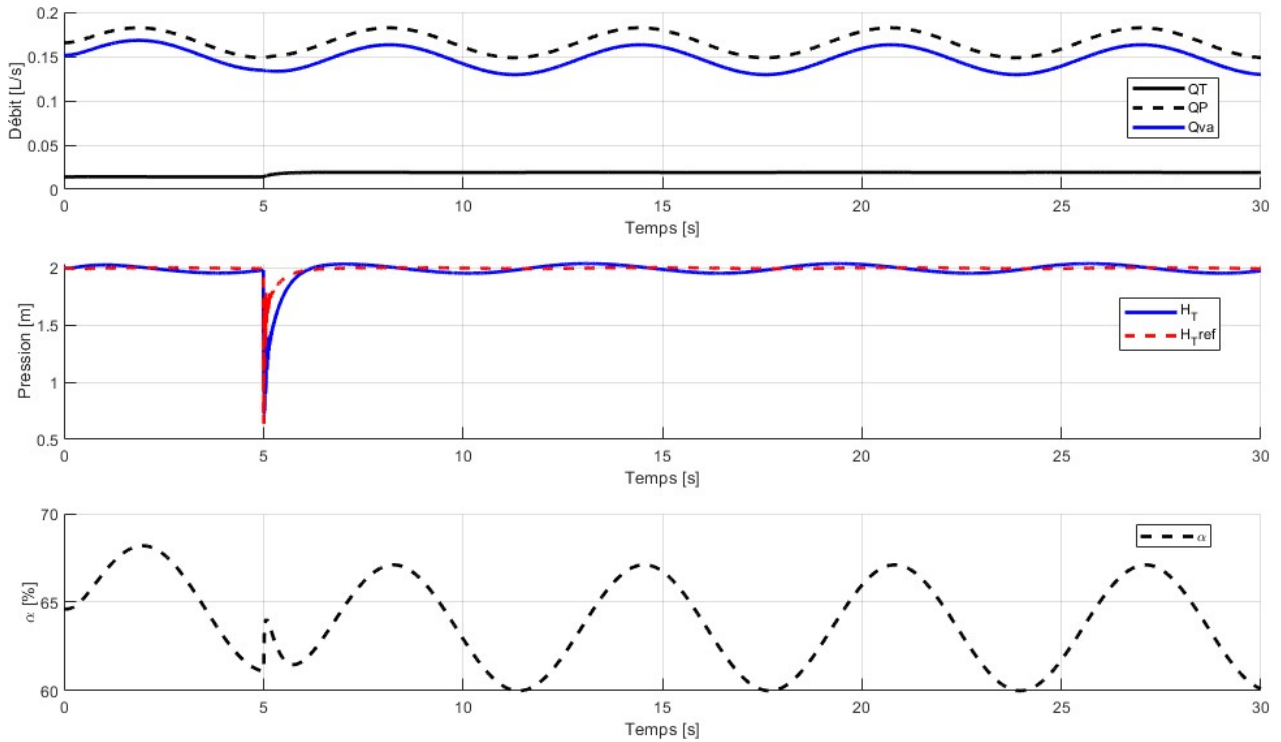


Figure 25. Resposta do sistema hidráulico com controlador de circuito aberto, gerador de ponto de ajuste e modelo de sensor integrado.

3.4 Conclusão

Os sensores permitem prever o impacto sobre o sistema. Como já vimos, este impacto é mínimo. Entretanto, os parâmetros dos sensores podem ser ajustados, para que o efeito dos mesmos sensores possa ser cada vez mais realista. O simulador da usina gera um ponto de ajuste que leva em conta o fenômeno do martelo d'água no sistema hidráulico. Posteriormente, outros elementos serão integrados no simulador da usina, de modo que a plataforma Hydro PHILL seja ainda mais parecida com uma usina de energia hidráulica.

4 Simulação em tempo real

4.1 Introdução

Um processador é definido como um sistema em tempo real quando é capaz de interagir com um processo físico a uma velocidade apropriada à evolução do mesmo [9]. Os sistemas mais poderosos em tempo real são baseados em componentes físicos, por exemplo, um Field Programmable Gate Array (FPGA), o que torna possível executar uma tarefa específica em alta velocidade. FPGA refere-se a um circuito integrado que consiste em um conjunto de células programáveis, estas células são capazes de executar diferentes funcionalidades. Um sistema em tempo real é capaz de interagir com o mundo real através de sinais aplicados a um atuador. Estes sinais de controle são normalmente gerados em uma saída analógica, na forma de um sinal de Modulação de Largura de Pulso (PWM), ou seja, um sinal cujo ciclo de trabalho varia [10].

Uma característica de um sistema em tempo real é sua capacidade de respeitar o período de amostragem imposto pelo processo. Esta característica é respeitada assim que o processador é capaz de realizar uma etapa suficientemente curta, ou seja, o número de medições e cálculos realizados por segundo é suficiente para não perder as características dinâmicas do sistema.

4.2 Materiais e métodos

4.2.1 OP4510

O OP4510 é um simulador de alto desempenho em tempo real, que permite o controle rápido de protótipos, que é implementado por sinais PWM de alta frequência. Este dispositivo tem muito boa conectividade, escalabilidade e versatilidade [11]. Este simulador é equipado com uma placa FPGA (Xilinx Kintex-7) e um processador Intel Xeon quad-core para fornecer alta potência computacional com etapas de tempo de sub-microsegundo. O OP4510 na configuração padrão oferece 32 saídas digitais, 32 entradas digitais, 16 saídas analógicas e 16 entradas analógicas. Os canais analógicos e digitais têm excelente condicionamento de sinal. A placa FPGA está ligada a uma arquitetura de CPU através de um link PCI5, o que garante uma troca de dados de alta velocidade. A figura 26 mostra o simulador com estas entradas e saídas.



Figure 26. Simulador em Tempo Real OP4510. [7]

³ Em eletrônica, o ciclo de trabalho é a relação entre a duração de um fenômeno periódico durante um período e a duração desse mesmo período.

⁴ O tempo entre duas medições sucessivas é chamado de período de amostragem.

⁵ A interface PCI é um dispositivo padrão interno de transmissão de dados para conectar a FPGA à CP

4.2.2 RT-Lab

RT-LAB é um software de simulação em tempo real que combina desempenho e simplicidade. Ela contribui para a evolução da engenharia de sistemas, acelerando o desenvolvimento de protótipos e validando rigorosamente as novas tecnologias. Sendo totalmente integrado com MATLAB e Simulink®, permite o projeto de modelos complexos e inovadores, mantendo ao mesmo tempo sua flexibilidade. De uma maneira muito simples, um modelo Simulink® torna-se uma aplicação interativa em tempo real, que é baixada para o OP4510, permitindo que sua interação com o mundo real seja simulada. RT-Lab é a tecnologia mais avançada para simulação em tempo real. É capaz de executar grandes modelos Simulink® em paralelo, distribuindo a carga por vários processadores. RT-LAB é uma solução econômica, escalonável e flexível que se baseia exclusivamente em produtos comerciais padrão. Além disso, o RT-LAB fornece uma interface que permite mudanças de parâmetros em tempo real. A Figura 27 mostra um resumo do uso do software.



Figure 27. Projeto, compilação e execução de um sistema em tempo real em RT-LAB [7].

4.2.3 Formatação do esquema Simulink ®

O software RT-LAB requer que o esquema Simulink® seja projetado de uma forma específica. RT-LAB fornece uma biblioteca de blocos Simulink®, que deve ser utilizada para aguardar o treinamento necessário para este software. O bloco "OpComm" na Figura 28.b) e os blocos "OpFcnCommonAnalogIn" e "OpFcnCommonAnalogOut" na Figura 28.a) são mostrados, sendo os dois últimos responsáveis, respectivamente, pelo envio dos sinais através das saídas analógicas da OPAL em volts e pela leitura das portas de entrada analógicas da OPAL.

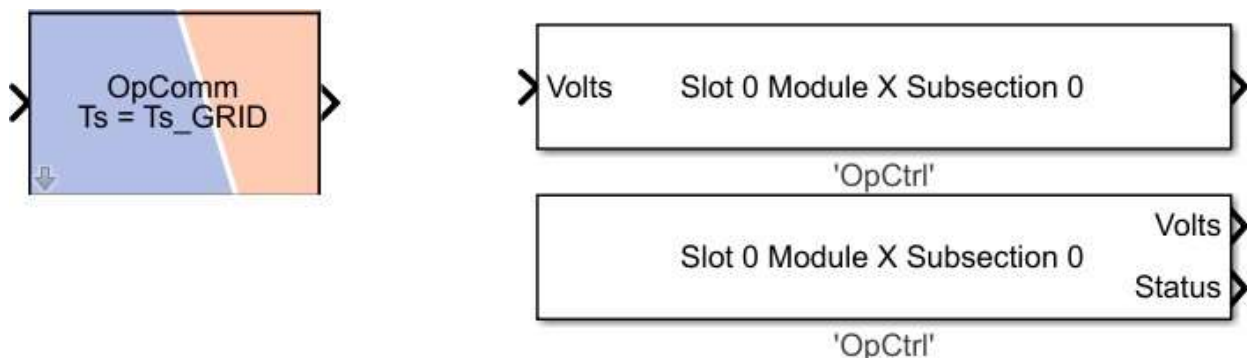


Figure 28. a) Bloco RT-LAB para recepção de sinais de outros blocos. b) Bloco RT-LAB para comunicação analógica.

A Figura 29 mostra o diagrama Simulink® completo, sem entrar em detalhes sobre o modelo de cada subsistema. O objetivo desta imagem é mostrar a comunicação entre os subsistemas, as linhas vermelhas representam a comunicação síncrona, que está sujeita ao período de amostragem do subsistema, e as linhas azuis representam a comunicação assíncrona. O seguinte mostra o funcionamento de cada subsistema.

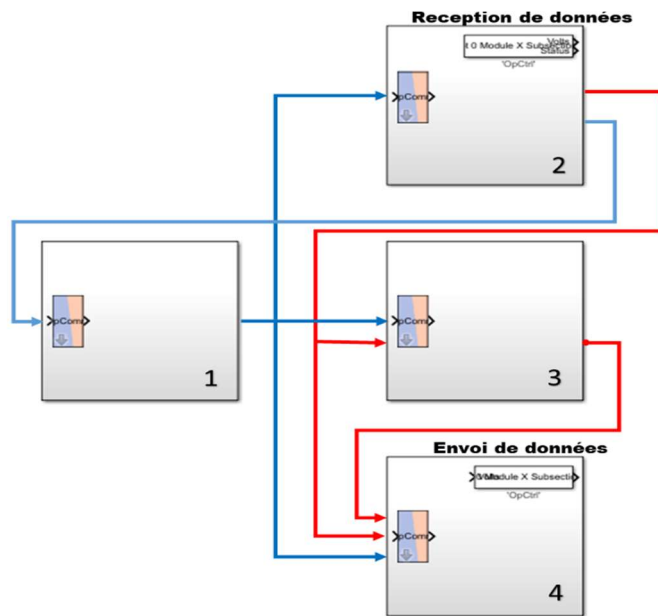


Figure 29. Uso de blocos RT-LAB e comunicação entre sistemas.

1. SC_IHM: Este sub-sistema fornece a interface em tempo real entre o usuário e os subsistemas, permitindo a mudança de parâmetros durante a execução de uma simulação. A comunicação entre este subsistema e outro subsistema é realizada exclusivamente através da comunicação assíncrona. Todas as trocas de informações entre os outros subsistemas são realizadas de forma síncrona.
2. SM_HydraulicCircuit: Este subsistema contém o modelo do circuito hidráulico, que será posteriormente substituído pela plataforma física, a comunicação entre a plataforma física e os outros subsistemas será realizada através dos sensores e atuadores.
3. SS_Controller: Este subsistema contém os métodos de controle implementados.
 SS_GRID: Este subsistema reproduzirá a operação da rede elétrica, será o subsistema com maior frequência de comunicação, porém é o sistema através do qual a comunicação analógica é realizada. No momento, estamos tentando validar a operação dos blocos "OpFcnCommonAnalogIn" e "OpFcnCommonAnalogIn". Na simulação em tempo real, portanto, as entradas e saídas analógicas são usadas para transferir dados entre o bloco SS_GRID e o bloco SS_IHM. Na verdade, os setpoints do bloco SS_controller são transferidos para o bloco SS_GRID através da comunicação síncrona e depois são transferidos para o bloco SM_Hydraulic_Circuit. Pode-se ver que esta transferência de dados foi realizada para validar a operação dos blocos RT-LAB, mas não corresponde à aplicação final que estamos tentando alcançar.

4.3 Resultados e discussão

Uma vez que o esquema Simulink® satisfaça todos os requisitos do software RT-LAB, ele é convertido para a linguagem de programação C e depois carregado para o OP4510 Real-Time Target. A figura 30 mostra o resultado da simulação em tempo real. O objetivo da **Figure 30** é apresentar o funcionamento do sistema em tempo real, para este fim nos concentramos apenas na queda de pressão na turbina *HT* e *Href*.

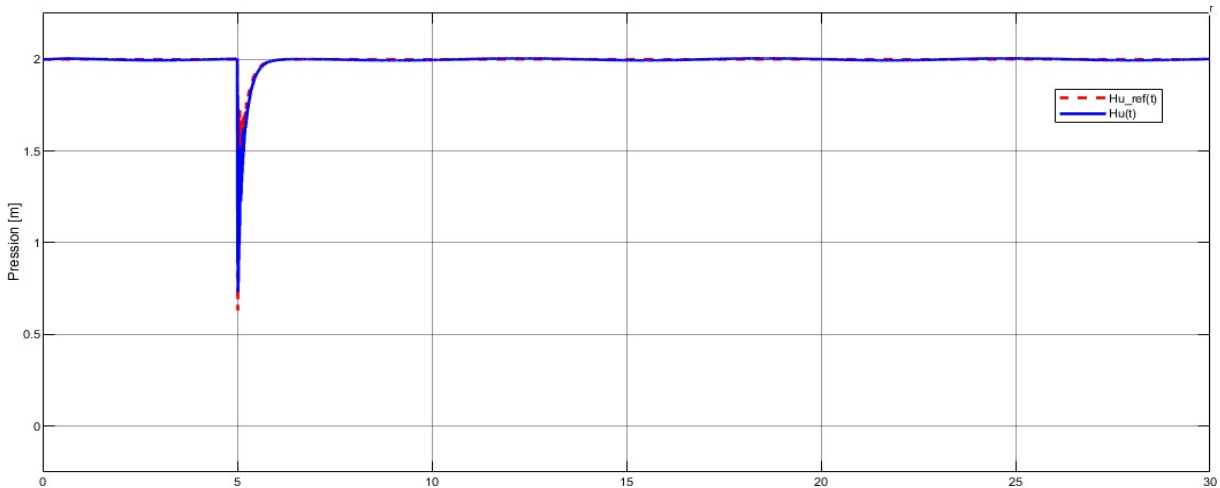


Figure 30. Queda de pressão ao redor da turbina durante simulação em tempo real.

Como pode ser visto na Figura 30, como o sistema foi projetado para funcionar em tempo real, o mesmo resultado é obtido anteriormente na simulação Simulink®.

4.4 Conclusão

RT-LAB é um excelente software para simulação em tempo real. Ele fornece análises de qualidade e resultados validados. RT-LAB empurra os limites dos testes de forma segura e poderosa, permitindo a simulação de um banco de testes complexo de uma forma simples e intuitiva. Em particular, através do teste que realizamos, asseguramos que o sistema projetado seja capaz de funcionar em tempo real sem perder informações. Assim, todas as medidas tomadas para a discretização dos modelos são validadas. Além disso, a formatação do esquema Simulink® tem respeitado todas as restrições exigidas pela biblioteca RT-LAB. Finalmente, a troca de informações através das entradas e saídas da OPAL funcionou bem.

5 Conclusão e Perspectivas

5.1 Perspectivas para o projeto Hydro PHILL

Neste manuscrito, focalizamos principalmente a proposta de um método para controlar a queda da borda da turbina através da porcentagem de abertura da válvula anular. No entanto, a velocidade da bomba também tem influência sobre a cabeça da turbina. A próxima parte do projeto procurará integrar um método de controle para que a vazão que sai da turbina colabore no controle do cabeçote na borda da turbina. Além disso, o objetivo é respeitar a área de operação da bomba, como mostrado na Figura 31.

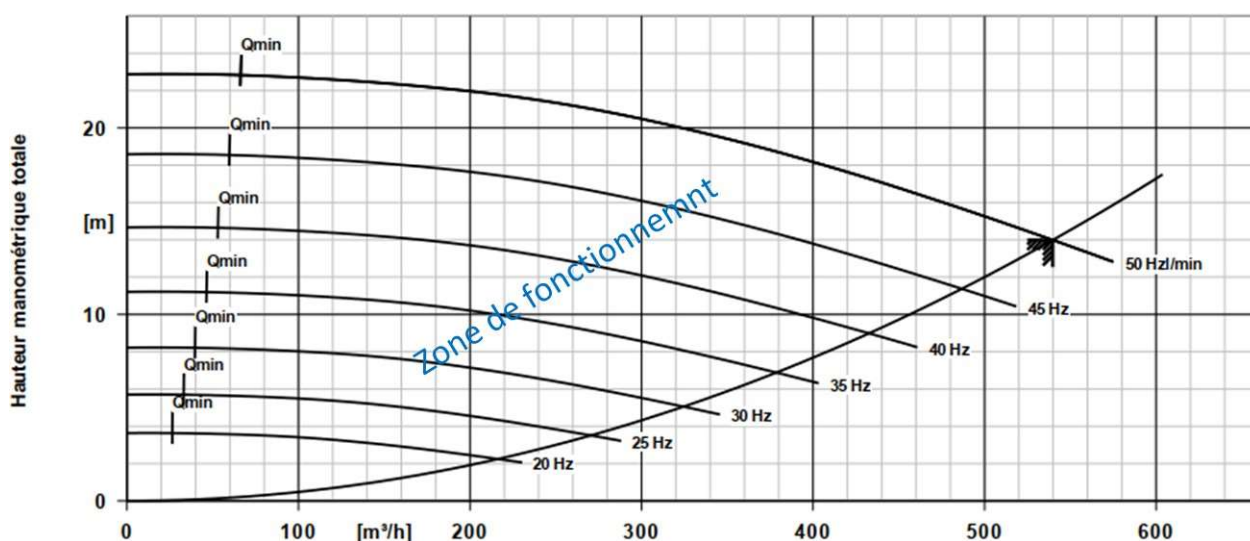


Figure 31. Curva característica da bomba hidráulica.

Além disso, outros elementos hidráulicos serão incluídos no simulador da usina, a fim de tornar o set point mais realista a cada vez. Por exemplo, uma chaminé de equilíbrio será integrada no simulador, de modo que, como as bacias, outros fenômenos característicos de uma central hidráulica possam ser levados em conta.

Finalmente, a instalação da plataforma física é parte da próxima etapa do projeto. Nesta fase, serão feitas as conexões entre os diferentes elementos da plataforma, tais como atuadores, sensores e o processador OP4510. A implementação física também permitirá o uso de medições reais do sistema como parâmetros de simulação, o que tornará a simulação ainda mais precisa.

5.2 Feedback do trabalho

O projeto Hydro PHILL aborda um tema em constante crescimento. A energia renovável se tornou um dos principais tópicos de pesquisa do mundo. É evidente que as energias verdes serão cada vez mais integradas nas redes mundiais uma vez que elas representam uma fonte de energia eterna e muito pouco poluente. Por esta razão, Hydro PHILL é um projeto muito interessante, além de ser uma excelente oportunidade para desenvolver minhas habilidades no campo da automação. O conteúdo técnico deste projeto tem contribuído enormemente para meu desenvolvimento profissional. Este estágio me deu uma direção para minha formação e especialização, já que as

energias renováveis se tornaram um grande foco. Além disso, sobre este mesmo assunto, encontram-se diferentes campos da engenharia, em particular, a eletrônica de potência e o automatismo constituem os campos nos quais tenho maior interesse.

Uma das principais habilidades desenvolvidas neste projeto é a habilidade de modelagem. Em geral, procuramos enriquecer a biblioteca de elementos hidráulicos através da modelagem de fenômenos físicos. Estes modelos são projetados para atender a uma necessidade, mantendo a simplicidade e a harmonia com os outros modelos do projeto. Além disso, estes modelos podem ser usados em diferentes contextos através da modificação de parâmetros.

Bibliografia

- [1] Electricité de France, «EDF,» 2020. [En ligne]. Available: <https://www.edf.fr/collectivites/electricite-gaz/electricite/option-energie-renouvelable>. [Accès le 06 Juin 2020].
- [2] S. Moreau, «Chiffres clés des énergies renouvelables.» Commissariat général au développement durable., 2019.
- [3] H. MESNAGE, «Modélisation et contrôle avancé pour les centrales de turbinage de moyenne et haute chute,» Grenoble, 2017.
- [4] SuperGrid Institute, 2020. [En ligne]. Available: <https://www.supergrid-institute.com/en/our-research-programmes/power-storage-balancing/>. [Accès le 06 Juin 2020].
- [5] Grenoble INP, «ecosystem,» Equipe projet APIOS, [En ligne]. Available: <https://www.grenoble-inp.fr/en/grenoble-inp/ecosystem>. [Accès le 11 06 2020].
- [6] G. Quinsac, «Lois de contrôle,» [En ligne]. Available: http://sesp.esep.pro/fr/pages_nanosats/nanosats-comprendre-techniques-lois-de-controle_impression.html. [Accès le 06 Juin 2020].
- [7] MathWorks®, «Simulation and Model-Based Design,» 2020. [En ligne]. Available: https://fr.mathworks.com/help/simulink/index.html?s_tid=CRUX_lftnav. [Accès le 11 06 2020].
- [8] J. W. S. Liu, «« Real-time Systems »,» Prentice Hall, 2000, p. Introduction.
- [9] AIT MANSOUR, «Electronique-mixte,» 26 01 2016. [En ligne]. Available: <https://www.electronique-mixte.fr/pwm/>. [Accès le 11 06 2020].
- [10] OPAL-RT Technologies, «OPAL-RT,» 2016. [En ligne]. Available: <https://www.opal-rt.com/fr/>. [Accès le 18 Mai 2020].

NEXO I - Discretização

Tendo a seguinte equação:

$$\frac{y}{u} = \frac{\partial h(S)}{\partial Q} = -\frac{H_0}{Q_0} \cdot \frac{t_w}{t_e} \cdot \frac{t_e \cdot s}{1 + t_e s}$$

Nós definimos :

$$gain = -\frac{H_0}{Q_0} \cdot \frac{t_w}{t_e}$$

Logo a equação que buscamos discretizar é a seguinte :

$$\frac{y}{u} = gain \cdot \frac{s}{s + \frac{1}{t_e}}$$

$$\dot{y} + y \cdot \frac{1}{t_e} = \dot{u} \cdot gain$$

$$\frac{y^+ - y}{T_e} + y \cdot \frac{1}{t_e} = \frac{u^+ - u}{T_e} \cdot gain$$

$$y \cdot z - y - (u \cdot z - u) \cdot gain = -\frac{T_e}{t_e} \cdot y$$

$$y \cdot \left(z - 1 + \frac{T_e}{t_e} \right) = u \cdot (z \cdot gain - gain)$$

$$\frac{y}{u} = \frac{z \cdot gain - gain}{z - 1 + \frac{T_e}{t_e}}$$