Logotipo

Descrição gerada automaticamente

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

FACULDADE DE TECNOLOGIA

ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

LABORATÓRIO 1 - PREPARAÇÃO DO AMBIENTE

Daniel Santiago da Silva

MANAUS-AM

2022

Daniel Santiago da Silva

LAB 01: SIMULAÇÃO DE SISTEMAS E REALIMENTAÇÃO

Primeiro Relatório da disciplina de Programação de Sistemas de Tempo Real referente à preparação do ambiente de trabalho que será avaliado pelo professor André Cavalcante junto ao Curso de Engenharia da Computação.

Professor: André Cavalcante

MANAUS-AM

2022

**SUMÁRIO**

1. **OBJETIVOS ...........................................................................................3**
2. **INTRODUÇÃO TEÓRICA ......................................................................4**
3. **ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DOS DIRETÓRIOS ...........................4**
   1. ARQUIVOS FONTES **.........................................................................4**
   2. ESTRUTURA DE DIRETÓRIOS **........................................................7**
   3. MAKEFILE **..........................................................................................8**
4. **ADTS ....................................................................................................18**
   1. DSTRING**...........................................................................................18**
   2. MATRIX**.............................................................................................20**
   3. INTEGRAL**.........................................................................................21**
5. **CONCLUSÃO ......................................................................................31**
6. **OBJETIVOS**

A construção de sistemas controlados é uma das áreas mais importantes da indústria nos dias de hoje. Poder projetar um sistema com características e comportamento desejado a partir de diversos estímulos e evitar ações indesejadas mediante a perturbações externas é principal foco da área de controle e automação.

Nesse meio, diversas técnicas são empregadas para garantir a modelagem de um sistema e funcionamento de um controlador e uma das mais importantes é a simulação. A partir dela é possível analisar o comportamento do projeto sem precisar desenvolvê-lo fisicamente, usando apenas suas especificações, assim evitando custos e atenuando as possibilidades de erros no processo.

Neste relatório será demonstrado o comportamento de um sistema modelado a partir de conversor CC-CC de potência por meio da simulação. Será aplicada diversas métodos de simulação tanto lineares quanto não-lineares, bem como a análise da variação dos parâmetros no comportamento dinâmico do sistema. Por fim, diversos de controladores serão projetados e sua ação na planta será descrita, além da modelagem em malha aberta e fechada. Os resultados obtidos serão discutidos apresentando as devidas relações e as respostas das questões contidas no Roteiro de Simulação. Dessa forma, espera-se entender o funcionamento das ferramentas de simulação e sua utilização na modelagem de sistemas e projeto de controladores junto do comportamento dinâmico do sistema linearizado e não-linear.

1. **INTRODUÇÃO**

A construção de sistemas controlados é uma das áreas mais importantes da indústria nos dias de hoje. Poder projetar um sistema com características e comportamento desejado a partir de diversos estímulos e evitar ações indesejadas mediante a perturbações externas é principal foco da área de controle e automação.

Nesse meio, diversas técnicas são empregadas para garantir a modelagem de um sistema e funcionamento de um controlador e uma das mais importantes é a simulação. A partir dela é possível analisar o comportamento do projeto sem precisar desenvolvê-lo fisicamente, usando apenas suas especificações, assim evitando custos e atenuando as possibilidades de erros no processo.

Neste relatório será demonstrado o comportamento de um sistema modelado a partir de conversor CC-CC de potência por meio da simulação. Será aplicada diversas métodos de simulação tanto lineares quanto não-lineares, bem como a análise da variação dos parâmetros no comportamento dinâmico do sistema. Por fim, diversos de controladores serão projetados e sua ação na planta será descrita, além da modelagem em malha aberta e fechada. Os resultados obtidos serão discutidos apresentando as devidas relações e as respostas das questões contidas no Roteiro de Simulação. Dessa forma, espera-se entender o funcionamento das ferramentas de simulação e sua utilização na modelagem de sistemas e projeto de controladores junto do comportamento dinâmico do sistema linearizado e não-linear.

1. **EXPERIMENTO 1: REPRESENTAÇÃO E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS EM AMBIENTE COMPUTACIONAL**

As simulações estão presentes em qualquer projeto de sistemas controlados hoje e suas aplicações e métodos são diversos. Neste trabalho, será aplicado a simulação em um Conversor CC modelado a seguir.

2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conversores CC-CC são dispositivos capazes de realizar um controle sobre o fluxo de potência de um a fonte de entrada para uma fonte de saída. Normalmente são formados por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores.

**2.1.1. Conversor CC-CC de potência da topologia buck**

Imagem em preto e branco

Descrição gerada automaticamente com confiança médiaOs conversores Buck são abaixadores de tensão tendo uma entrada em tensão e uma saída em corrente. O diagrama elétrico dele é apresentado a seguir além de suas etapas de funcionamento.

Figura 1: Conversor Buck

**1ª Etapa (0, DTs):** S está conduzindo. A corrente circula por *Lo* e pela saída. Nesta etapa *Vi* fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor *Lo*.

**2ª Etapa (DTs, (1-D)Ts):** S está bloqueado. No instante de abertura de *S* o diodo *D* entra em condução. A energia do indutor é transferida para a carga, isto é, o indutor é desmagnetizado.

A relação entre a tensão de saída e a de entrada é dada por D:

O conversor Buck pode operar em três modos de operação:

**1º - Condução Contínua:** a corrente em *Lo* não se anula durante um período de comutação;

**2º - Condução Descontínua:** a corrente em *Lo* se anula a cada período de comutação;

**3º - Condução Crítica:** a corrente em *Lo* está no limiar de se anular a cada período de comutação.

O Diagrama elétrico do conversor a ser modelado é apresentado a seguir bem como as equações diferenciais obtidas por meio do modelo em espaço médio e algumas relações.

Diagrama, Esquemático

Descrição gerada automaticamente

Figura 2: Conversor Buck a ser modelado

onde sabe-se que e

• *iL*(t): sinal de corrente no indutor em A.

• *vC*(t): sinal de tensão do capacitor em V.

• *d*(t): sinal de ciclo de trabalho, essa é a entrada a ser controlada no problema.

• *vin*(t): sinal de tensão na entrada do sistema em V.

• *P*(t): Potência da carga não linear em W.

• *R*: Resistência de carga em Ω.

• *L*: Indutância do indutor em H.

• *rL*: Resistência de enrolamento do indutor em Ω.

• *C:* Capacitância do capacitor em F.

onde a saída do sistema é a tensão entregue a carga *R*. Os estados do circuito são *iL* e *vC*. O sistema pode ser modelado por uma entrada controlada *d* e duas entradas não controladas *vin* e P(t). Os valores nominais do circuito estão indicados na tabela a seguir.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parâmetro | Símbolo | Valor | Unidade |
| Tensão de entrada | *Vin* | 20 | V |
| Tensão de saída | *Vout* | 12 | V |
| Ciclo de trabalho | *d* | 0,6 | - |
| Potência da CPL | *Po* | 10 | W |
| Resistência de carga | *R* | 4 | Ω |
| Indutância | *L* | 1 | mH |
| Resistência de enrolamento | *rL* | 0 | Ω |
| Capacitância | *C* | 2,2 | mF |

Tabela 1: Parâmetros do sistema

2.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

1. Determinamos o ponto de operação do estado de corrente e do estado de tensão do sistema, além do ponto de operação da saída para os parâmetros da Tabela 1.
2. Realizamos a simulação do sistema não linear através do uso de diagrama de blocos funcionas da extensão Simulink utilizando um passo de simulação de 1×10−5.
3. Realizamos a simulação do sistema não linear através da aproximação de Euler usando um tempo de amostragem de 1×10−5.
4. Realizamos a simulação do sistema não linear através do método numérico Runge-Kutta de 4ª ordem utilizando um passo de simulação de 1×10−5.
5. Com o ponto de operação calculado em 1, determinamos o modelo linearizado por espaço de estados.
6. Com o ponto de operação calculado em 1, determinamos o modelo linearizado por função de transferência.
7. Realizamos a simulação do modelo linear em 5 e 6.
8. Comparamos os resultados obtidos pelo modelo não linear com os resultados obtidos pelo modelo linear.
9. Repetimos os itens de 1 até 7 considerando R = [2, 6, 8, 10] Ω e avaliamos como a mudança de R modifica o comportamento dinâmico da planta.
10. Repetimos os itens de 1 até 7 considerando *Po* = [0, 15, 30, 70] W e avaliamos como a mudança de *Po* modifica o comportamento dinâmico da planta.
11. Repetimos os itens de 1 até 7 considerando *C* = [0.5, 1.0, 1.5, 2.5] mF e avaliamos como a mudança de C modifica o comportamento dinâmico da planta.

2.3. RESULTADOS

Primeiramente para determinar os pontos de operação do estado de corrente, do estado de tensão é preciso igualar as Eq.4 e Eq.5 a 0.

Pela *Eq.2* a tensão de saída do sistema é igual a tensão do capacitor então o ponto de operação da saída também é 12 V. Dessa forma obtemos os pontos de operação do conversor:

O diagrama de blocos, o método de Euler e o Runge-Kutta de 4ª ordem foram simulados no software Matlab com auxílio do Simulink. Para facilitar a implementação das EDOs, seus coeficientes foram separados em 4 variáveis: Substituindo-as nas Eq. 4 e Eq. 5 obtemos:

As simulações foram feitas utilizando um passo de 1e-5 a sua duração foi de 0,14 segundos. A entrada usada foi d = 0,6 até o tempo 0,08 s quando ela sofre um acréscimo de 5% para que se possa observar melhor as diferenças entre a linearização e o modelo não linearizado. As condições iniciais definidas Diagrama, Esquemático

Descrição gerada automaticamenteforam *vC* = 0,1V e *iL* = 0 A.

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamente

Figura 3: Diagrama de Blocos SIMULINK

Figura 4: Simulação pelo Diagrama de Blocos, método de Euler e Rugen-Kutta de 4ª ordem.

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamenteComo é possível observar na figura 4, temos os resultados dos três métodos de simulação não-linear no gráfico, contudo é possível perceber apenas duas linhas, a laranja (Discretização por Euler) e a amarela (Rugen-Kutta de 4ª ordem), a linha azul não fica bem visível pois ela está sob a linha amarela. Isso ocorre por conta do grau de precisão do Rugen-Kutta, que é superior ao método de Euler e se aproxima da precisão do Diagrama de Blocos. Podemos ver melhor essa diferença entre Euler e Rugen na Figura 5.

Figura 5: Diferença nos métodos de aproximação.

A diferença entres esses métodos é bastante acentuada no início da simulação, contudo, conforme o sistema se estabiliza no valor de regime permanente, essa diferença tende a diminuir e passa a quase não existir quando se aplica a variação de 5% na entrada (Figura 6).

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamente

Figura 6: Diferença nos métodos de aproximação durante a variação da entrada no tempo 0,08 s. .

A partir dos pontos de operação calculados anteriormente é possível linearizar o sistema. Podemos utilizar o método da Jacobiana. Os estados do modelo linearizado serão e , a entrada será e a saída será .

Montando as matrizes dos estados e calculando a função de transferência:

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamenteSimulando o modelo linear por meio da função de transferência e do espaço de estados com condições iniciais iguais as usadas na simulação não-linear obtemos o seguinte gráfico.

Figura 7: Simulação do modelo linearizado pelo espaço de estados e pela função de transferência.

No modelo linear percebe-se que a amplitude inicial é maior que a obtida na simulação não-linear e acaba ferindo a definição imposta para a saída na Eq. 3. As variações entre o resultado da simulação no Espaço de Estados e na Função de Transferência é pequeno, ou seja, ambos possuem um grau de precisão parecido. Agora comparando com as simulações anteriores nota-se um comportamento inicial um pouco dissonante enquanto o sistema se estabiliza. A partir do ponto de operação, as duas plantas tendem a apresentar o mesmo comportamento. Contudo, a medida em que se afasta desse ponto, a planta não-linear começa a defasar.

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamente

Figura 8: Comportamento geral da planta linear e da não-linear

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamente

Figura 9: Comportamento das plantas em torno do ponto de operação.

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamente

Figura 10: Comportamento defasado entra as plantas fora do ponto de operação.

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamenteO comportamento dinâmico da planta também pode ser afetado pela mudança dos parâmetros inicialmente definidos na Tabela 1. Ao se variar o R nos valores de 2, 6, 8 e 10 obtemos as seguintes curvas para o modelo não-linear e para o linear respectivamente.

Figura 11: Simulação não linear variando R

Gráfico

Descrição gerada automaticamenteAo realizar a simulação no diagrama de blocos para os diferentes valores de R, percebe-se uma mudança no pico que aumenta junto com R, enquanto o tempo de acomodação também aumenta, ou seja, quanto maior for o valor dessa resistência, mais tempo será necessário para que a planta atinja o regime permanente. Simulando com a função de transferência constatamos o mesmo resultado.

Figura 12: Simulação linear variando R

Pela Eq. 9 da função de transferência do sistema, podemos chegar a mesma conclusão descrita no parágrafo anterior. Analisando o polinômio característico percebe-se que o R não influência no , pois faz produto com *rL* que é igual a 0, mas influencia no coeficiente de amortecimento de maneira inversamente proporcional, por isso ao se diminuir R, aumenta e o sistema se torna mais amortecido.

Agora partindo para a simulação não-linear e linear variando os valores de *PO* entre 0, 15, 30 e 70 W temos um resultado diferente, nesse caso o sistema sofre uma alteração no tempo de pico que aumenta conforme *PO* diminui, há mudanças no valor do pico de maneira inversamente proporcional bem como o sistema demora mais a se estabilizar quando *PO* diminui.

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamente

Figura 13: Simulação não linear variando *PO*

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamenteAnalisando a função de transferência da Eq. 9 conclui-se que *PO* altera diretamente o grau de amortecimento de uma forma proporcional enquanto não produz nenhum efeito na frequência natural do sistema.

Figura 14: Simulação linear variando *PO*

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamentePor fim, ao se variar os valores de *C* em 0.5, 1, 1.5 e 2.5 mF obtemos diversas mudanças na dinâmica do modelo. Primeiramente nota-se que o sistema fica mais lento conforme *C* aumenta diminuindo a oscilação, já os tempos de pico e de acomodação aumentam, bem como o valor do pico.

Figura 15: Simulação não linear variando *C*

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamentePartindo para a análise da função de transferência, Eq. 3, temos alterações tanto no valor do grau de amortecimento como na frequência natural, sendo em ambos os casos inversamente proporcional, reiterando os resultados encontrados nas simulações.

Figura 16: Simulação linear variando *C*

1. **EXPERIMENTO 2: SISTEMAS DE CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO**

A realimentação e a definição de parâmetros são muito utilizadas no projeto de controladores, dessa forma para o experimento 2 será feita uma comparação do comportamento do sistema utilizando malha fechada além do projeto de alguns tipos de controladores.

3.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Imagem em preto e branco

Descrição gerada automaticamenteUma das diversas técnicas para controlar um sistema e aumentar sua precisão é a realimentação da saída, esses sistemas ficam conhecidos como malha fechada e tem como principal característica monitorar os valores da saída atual e comparar um valor pré-estabelecido a fim de detectar eventuais erros ou desvios, mantendo o controlador informado a respeito deles para que possam ser corrigidos da melhor forma. A seguir temos uma estrutura de realimentação.

Figura 17: Estrutura de feedback

A função de transferência global *T*(*s*) é dado por

**3.1.1. Especificações de desempenho de sistemas dinâmicos**

Para projetar um controlador é necessário definir certos parâmetros que descrevam o desempenho de um sistema ao sofrer determinados estímulos. O estímulo mais utilizado para essa análise é a resposta ao degrau que descreve o sistema em regime permanente e regime transitório.

* **Tempo de subida (Tr):** é o tempo necessário para a sinal de saída variar de 10% a 90% (sistemas subamortecidos) ou de 0% a 100% (sistemas sobreamortecidos) do valor final, para sistemas de segunda ordem uma boa aproximação para o tempo de subida é dada pela equação a seguir.
* **Tempo de acomodação (Tss)**: é o tempo gasto para o sinal acomodar na região delimitada por ess.
* **Máximo sobressinal (Mp):** diferença entre o valor máximo de pico atingido e o valor final em percentual do valor final, para sistemas subamortecido o máximo sobressinal é calculado pela equação a seguir.
* **Tempo de pico (Tp):** instante de tempo em que ocorre o valor máximo (ou mínimo) é atingido, seu cálculo pode ser feito pela equação abaixo.
* **Tempo de atraso (Td):** é o tempo para o sinal alcançar 50% do valor final;
* **Erro em regime permanente (ess):** é a diferença entre o valor de referência e o valor final da resposta.

3.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

1. Considerando o sistema em malha aberta (*H*(*s*) = 0 e *C*(*s*) = 1), calculamos as especificações de tempo de acomodação, tempo de subida, tempo de pico, tempo de atraso e máximo sobressinal.
2. Aplicando um degrau unitário na entrada de *G*(*s*), verificamos as especificações de tempo de acomodação, tempo de subida, tempo de pico, tempo de atraso e máximo sobressinal e comparamos com os valores calculados no item anterior.
3. Consideramos o sistema em malha fechada sob ação de um controlador proporcional *C*(*s*) = *kP*, e um sensor ideal *H*(*s*) = 1 e calculamos o valor de *kP* para garantir um erro de 10%, 5%. 2% e 1% em regime estacionário. Simulamos a resposta dinâmica do sistema para cada situação, aplicando um degrau unitário de referência.
4. Consideramos o sistema em malha fechada sob ação de um controlador proporcional-integral (PI) , e um sensor ideal *H*(*s*) = 1. Escolhemos 5 valores para *kP* e *kI* e simule o sistema sob ação do controlador PI.
5. Consideramos o sistema em malha fechada sob ação de um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) , e um sensor ideal *H*(*s*) = 1. Escolhemos 5 valores para *kP*, *kI* e *k*D e simule o sistema sob ação do controlador PID.
6. Projetamos um controlador PID através da solução da equação Diofantina de forma a garantir que o sistema em malha fechada tenha um tempo de acomodação de no máximo 0,1 s, máximo sobressinal de no máximo 10% e erro nulo para uma entrada ao degrau unitário.
7. Simulamos o sistema sob ação do controlador projetado no item anterior.
8. Para o controlador PID projetado, simulamos o sistema considerando que o sensor tenha função de transferência

3.3. RESULTADOS

Considerando a seguinte função de transferência dada pelo roteiro para a planta usada no experimento 1 temos:

Substituindo os valores da Tabela 1 podemos calcular as especificações do sistema como o tempo de acomodação, tempo de subida, tempo de pico, tempo de atraso e máximo sobressinal. Primeiramente precisamos encontrar o grau de amortecimento e a frequência natural do sistema que podem ser calculados através dos coeficientes do polinômio característico.

Calculando o tempo de subida com a Eq. 11:

Usando a Eq. 12 obtemos o tempo de acomodação para um erro no regime estacionário de 1%:

Para encontrar o máximo sobressinal usamos a Eq. 13 e conseguimos o seguinte valor:

O tempo de pico pode ser calculado a partir da Eq. 14:

Gráfico

Descrição gerada automaticamenteAplicando a entrada de degrau unitário a função de transferência global em malha aberta (*H*(*s*) = 0 e *C*(*s*) = 1) temos a seguinte simulação:

Figura 18: Resposta ao degrau do sistema em malha aberta.

A partir do gráfico conseguimos os seguintes valores para as especificações:

Percebe-se que o cálculo das especificações do tempo de acomodação, e de pico além do máximo sobressinal tiveram uma precisão bastante alta, já o tempo de subida obteve um erro de 70,8% em relação ao valor real visto no gráfico, ou seja, esse cálculo deve ser considerado apenas como uma aproximação.

Em seguida, foi realizada a simulação para o sistema em malha fechada com um controlador de ganho proporcional específico para valores de erros iguais a 10%, 5%, 2% e 1% e entrada de degrau unitário. Para encontrar *kP* é necessário calcular a função de transferência com os valores substituídos da Tabela 1 usando a Eq. 15:

Com o valor número da função de transferência basta aplicar a fórmula do erro em malha fechada para obter *kP*.

Dessa forma, os valores de *kP* para os erros descritos acima são:

Diagrama

Descrição gerada automaticamenteUma imagem contendo Diagrama

Descrição gerada automaticamente

Figura 19: Diagrama de blocos para os controladores P, PI e PID.

Figura 20: Resposta ao degrau do sistema em malha fechada com *kP* variável.

Pelo gráfico acima (Figura 20) nota-se que o sistema se comporta diferente à medida que o valor de *kP* aumenta, ele se torna mais oscilatório e com um maior sobressinal além de ter seu erro no regime estacionário menor. A oscilação aumenta porque o ganho proporcional afeta proporcionalmente o valor da frequência natural do sistema.

Outra característica de um controlador com apenas o ganho proporcional é incapacidade de garantir erro nulo ao degrau. Isso se dá ao fato desse tipo de controlador não agregar um polo nulo ao sistema, ou seja, se a planta for do tipo 0 e o sensor for perfeito, a função de transferência global também será do tipo 0 induzindo um certo erro ao degrau.

É possível caracterizar a influência do desse ganho proporcional na função de transferência global com sensor perfeito da seguinte maneira:

Na função de transferência do sistema de malha aberta (Eq. 15) o parâmetro *Vin*é responsável apenas pelo tamanho do máximo sobressinal, contudo em malha fechada ele altera também o valor de como visto na Eq. 20. A indutância *L* e a capacitância *C* também causa uma maior influência de inversamente proporcional na frequência natural por conta do termo independente adicionado no denominador.

Partindo para a análise de um controlador PI, foram selecionados 5 valores arbitrários para *kP*  e *kI* visto abaixo e em seguida foram realizadas simulações:

Uma imagem contendo Calendário

Descrição gerada automaticamente

Figura 21: Resposta ao degrau do sistema em malha fechada com *kP* e *kI* variável.

Nas 3 primeiras curvas há uma variação de *kI* enquanto *kP* permanece constante gerando respostas um pouco discutíveis em relação ao comportamento esperado. A introdução da ação integral no controlador deveria gerar uma alteração proporcional no máximo sobressinal e na velocidade do sistema, contudo ele passa a demorar mais para atingir o estado estacionário quando *kI* aumenta. Já o aumento de *kP* diminui esse tempo que sistema leva para atingir o estado estacionário além de aumentar sua oscilação.

Em geral, o efeito desse controlador PI pode ser analisado a partir da função global do sistema com o controlador com a função de transferência igual a Eq. 18 e sensor perfeito *H*(*s*) = 1.

Nota-se que os ganhos do controlador agem apenas sobre dois coeficientes do polinômio característico, assim ele não o modifica por completo. Para controle total desse polinômio é preciso adicionar o ganho derivativo no controlador, como demonstrativo simulamos essa adição para 5 valores de *kD­* obtendo as seguintes curvas:

Tabela

Descrição gerada automaticamente com confiança média

Figura 22: Resposta ao degrau do sistema em malha fechada com *kD* variável.

Quando aumentamos o valor de *kD*, o sistema passa a se estabilizar mais rapidamente, contudo a comportamento esperado seria uma maior suavização da curva, o que não ocorreu nesse caso. Aplicando o controlador na função de transferência da Eq. 15 podemos verificar como ela afeta sensibilidade da planta:

Eq. 22

Na Eq. 22 pode-se perceber que os ganhos do controlador estão presentes em todos os coeficientes do polinômio característico, sendo assim, é possível ter um controle ainda maior sobre a planta. Outro ponto perceptível na equação acima o aumento da sensibilidade da planta para os parâmetros *Vin*, *L* e *C*, já que todos aparecem sendo multiplicados pelos ganhos PID.

A seguir foi projetado um controlador PID através da equação diofantina para tender aos critérios de erro nulo ao degrau, máximo sobressinal de 10% e tempo de acomodação de 0.1 s.

Definindo o polinômio desejado pela forma abaixo e com *p*o igual a 10\*

Definindo o polinômio característico da malha fechada com controlador PID através do denominador da Eq. 22:

Para definir os coeficientes de ganho é preciso igualar a Eq. 23 a Eq. 24 e resolver o seguinte sistema:

Simulando o sistema com o controlador encontrado temos a curva a seguir:

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamente

Figura 23: Resposta ao degrau do sistema com controlador PID projetado.

Ao projetar os ganhos desse controlador PID obtemos uma resposta diferente da encontrada nos controladores com valores aleatórios. Percebe-se que com o *kD, kP* e *kI* calculado através da equação diofantina, o comportamento da curva de resposta ao degrau é de fato mais suave, sub-amortecida e menos oscilatória, contudo surge um *undershooting* logo no início do gráfico. Um comportamento bastante indesejado apresentado no gráfico é a não conformidade com os parâmetros pré-estabelecidos, o sistema atinge sobressinal maior que 10% e um tempo de acomodação maior que 0.1 segundos.

Para finalizar o experimento, foi adicionado um conjunto de sensores *H*(*s*) a fim de identificar a influência deles na dinâmica do projeto. Os valores dos filtros usados foram .

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamente

Variando o valor de H o sistema decai e passa a oscilar abaixo de 0, e se torna instável, com um formato parecido com o de uma rampa. Quando o valor do ganho de H(s) e do polo se tornaram muito altos (iguais a 1000), então o sistema varia em um módulo maior e cresce em uma rampa mais inclinada.

1. **CONCLUSÃO**

As técnicas de controle são muito utilizadas em diversos sistemas da indústria de nosso dia a dia. Dessa forma o presente relatório buscou apresentar algumas dessas técnicas básicas como a representação computacional de um modelo bem como suas simulações em malha aberta e fechada. Além disso foram feitas algumas análises a respeito de como certos parâmetros afetam a dinâmica do projeto.

No primeiro experimento pode-se realizar a representação computacional por alguns métodos lineares e não-lineares bem como avaliar a precisão de alguma dessas aproximações. Para o modelo não-linear foram utilizadas as técnicas de aproximação de Euler e de Rugen-Kutta, bem como a simulação por diagrama de blocos do simulink, sendo que as duas últimas se mostraram mais precisas. No modelo linearizado a partir de um ponto de operação foi realizada uma simulação por espaço de estado e outra por função de transferência.

Ao se analisar a curva para um modelo linear e outra não linear, percebe-se uma diferença mínima em torno do ponto de operação que cresce quanto mais se afasta dele, ou seja, eles se comportam de maneira parecida até certo momento que o modelo não-linear passa a defasar em comparação ao linear.

Em seguida, foram feitas diversas simulações a fim de verificar a atuação de alguns parâmetros da planta na dinâmica do sistema. Ao variarmos as resistências da carga (*R*) e a capacitância do capacitor (*C*) encontramos uma relação proporcional, na qual tanto o máximo sobressinal quanto o tempo de acomodação aumentavam à medida que esses parâmetros subiam, ou seja, seu amortecimento diminuía. Também foi possível observar que para a capacitância à medida que aumentava, o sistema ficava mais lento. Para a potência o comportamento era o oposto, quanto maior o *PO* mais amortecido era o sistema.

O experimento 2 consistiu nas verificações das especificações da planta em malha aberta além da sua simulação em malha fechada com diversos tipos de controladores e sensores. Primeiramente encontrou-se as especificações de tempo de acomodação, tempo de subida, tempo de pico e máximo sobressinal a partir das fórmulas apresentadas na fundamentação teórica e comparamos com as informações extraídas diretamente da simulação. Os resultados obtidos foram muito próximos aos calculados para o tempo de acomodação, tempo de pico e máximo sobressinal, já o tempo de subida apresentou uma diferença bem acentuada, contudo isso já era esperado pois sua fórmula é descrita como apenas uma aproximação.

Em seguida foram feitas algumas simulações em malha fechada com determinados valores de *kp* que satisfaziam as condições de erro de 10%, 5%, 2% e 1%. Esses resultados mostraram os efeitos de um controlador P em malha fechada. Quanto maior era o ganho proporcional, maior era o sobressinal e sua frequência natural, enquanto o erro tendia a diminuir.

Logo após, foram realizadas simulações com controladores PI e PID variando os ganhos integral e o derivado. Para uma ação integral maior, tivemos resultados de uma maior frequência natural e menor acomodação, já quando se aumentava o *kD* era obtido uma maior oscilação e maior amortecimento, demorando muito menos para o sistema se estabilizar.

Por fim, um controlador PID foi projetado com especificações de desempenho pré-definidas, contudo o comportamento não foi satisfatório apresentando tanto um sobressinal muito alto, como um tempo de acomodação também elevado, acrescido da ocorrência de *undershooting*. Ao se aplicar a variação dos sensores, obtivemos uma resposta ainda mais diferente, deixando o sistema instável visto que ele se comportava como uma rampa sem regime estacionário.

Ao final das análises e das simulações, a compreensão sobre a modelagem e representação computacional de modelos foi acrescida consideravelmente, bem como o entendimento sobre as influências na dinâmica do sistema causadas pelos parâmetros da planta e pelas ações dos controladores. Foi possível observar as relações teóricas sendo comprovadas nas simulações, apesar de haver alguns casos em que o comportamento esperado não ocorreu. Assim, este trabalho se mostrou de extremo valor, tanto para o aluno quanto para o professor, podendo assim reforçar ainda mais o conhecimento de ambos os lados, em especial o do discente.

**5. REFERÊNCIAS**

BESSA, Isaías V. Aula 05: Análise dinâmica de sistemas. Manaus: Departamento de Elétrica - UFAM.

BESSA, Isaías V. Roteiro: Simulação de sistemas e realimentação. Manaus: Departamento de Elétrica - UFAM.

PEREIRA, Heverton. Aula 06 - Conversores CC/CC. Viçosa: Departamento de Engenharia Elétrica - UFV.

PETRY, Clóvis A. Introdução aos Conversores CC-CC. Florianópolis: UFSC, 2001.