

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

Trabalho de Conclusão de Curso

Modelagem, Controle e Simulação de uma
Engomadeira Industrial de Grande Porte

Wesley Catão Fadlo Curi

14/8/2008

Orientador: Dr. Pericles Rezende Barros



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

“O único lugar onde sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”

Albert Einstein

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao Professor Péricles, por sua valiosa colaboração e orientação, e agradeço especialmente aos meus pais, pelo apoio e confiança que sempre me deram. À coordenação de elétrica, em especial a Adail, pela sua atenciosa dedicação aos estudantes. À equipe de engenheiros elétricos da Coteminas, em especial a Arthur e Sérgio Torres, por gentilmente me conceder acesso a fábrica para compreender melhor o comportamento desta máquina. Aos meus colegas de classe, os quais me acompanharam nesta graduação. Em especial a Bethelânia, por sua plena dedicação ao meu futuro e bem estar. Obrigado a todos,

Wesley Catão Fadlo Curi

Resumo

Atualmente, o processo de engomagem industrial consiste em etapa de fundamental importância para a confecção de artigos têxteis. Este trabalho trata da modelagem matemática, desenvolvimento de estratégia de controle, e simulação da operação de uma engomadeira industrial de grande porte. Na modelagem, são levados em consideração todos os aspectos pertinentes ao processo de engomagem. Mostra-se em detalhes na simulação, através de gráficos, a dinâmica do funcionamento do sistema.

Palavras-chave: Engomadeira, controle, têxtil, simulação, operação.

Sumário

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
LISTA DE FIGURAS	VIII
1. INTRODUÇÃO	9
2. ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO	10
3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA	11
3.1. Definição de Engomagem	11
3.2. Gaiola	11
3.3. Caixa de Goma	12
3.4. Zona de Secagem	13
3.5. Campo de Separação a Seco	13
3.6. Bobinador	14
3.7. Células de Carga ou tensiômetros	14
4. MODELAGEM DOS COMPONENTES DA ENGOMADEIRA	15
4.1. Considerações Iniciais	15
4.1.1. Dinâmica de Movimentos Rotacionais	15
4.1.2. Sistemas de 2ª Ordem	15
4.1.3. Funções com Atraso	16
4.1.4. Sistemas Amostrados	16
4.1.5. Cálculo numérico de variáveis de controle	16
4.1.6. Nomenclatura das variáveis e constantes	17
4.2. Modelagem dos Sensores de Velocidade (Encoders)	17
4.3. Modelagem das Células de Carga (Tensiômetros)	17
4.4. Modelagem dinâmica do rolo da gaiola com freio	18
4.5. Modelagem dinâmica do conjunto tracionador de entrada	20
4.6. Modelagem dinâmica do rolo da secadeira	21

4.8.	Modelagem dinâmica do rolo tracionador de saída	22
4.9.	Modelagem dinâmica do rolo enrolador.....	22
4.10.	Modelagem termodinâmica do rolo da secadeira.....	23
4.11.	Modelagem da caixa de goma.....	23
4.11.1.	Nível como variável de estado	24
4.11.2.	Temperatura como variável de estado	24
4.12.	Modelagem do Sensor de Umidade	25
5.	ESPECIFICAÇÕES DE OPERAÇÃO.....	26
5.1.	Fios.....	26
5.2.	Gaiola.....	26
5.3.	Especificação de operação da caixa de goma	26
5.3.1.	Nível da goma.....	26
5.3.2.	Temperatura da goma.....	26
5.3.3.	Rolos Impregnadores-Espremedores.....	27
5.4.	Zona de Secagem	27
5.5.	Bobinamento.....	27
6.	CONTROLE E OPERAÇÃO.....	28
6.1.	Problemas mais frequentes.....	28
6.2.	Controle adaptativo	28
6.3.	Descrição do Controlador.....	28
6.4.	Controle de tração baseado na medição da célula de carga CC1.....	29
6.5.	Controle de tração baseado na medição da célula de carga CC2.....	30
6.6.	Controle de tração baseado na medição da célula de carga CC3.....	31
6.7.	Controle de tração baseado na medição da célula de carga C4.....	32
6.8.	Controle de tração baseado na medição da célula de carga C5.....	32
7.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	33
7.1.	Modelo Numérico Utilizado para Simulação	33
7.1.1.	Rolo desenrolador ou de gaiola	33

7.1.2.	Rolo Tracionador	35
7.1.3.	Rolo Bobinador	35
7.1.4.	Tanque.....	35
7.2.	Controle de Velocidade	37
7.3.	Controle de Tração.....	37
7.3.1.	Modelo do Controlador.....	37
7.4.	Controle no Tanque	38
	O controle no tanque é basicamente de dois tipos:.....	38
7.4.1.	Controle de Nível.....	38
7.4.2.	Controle de Temperatura.....	38
8.	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	39
8.1.	Simulação de Controle de Tração	39
8.2.	Simulação do Controle de Nível e Temperatura	42
8.2.1.	Controle de Nível.....	42
8.2.2.	Controle de Temperatura.....	43
9.	CONCLUSÃO	46
10.	BIBLIOGRAFIA	47
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
	ANEXOS	49

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema dos elementos constituintes de uma engomadeira industrial de grande porte	11
Figura 2: Foto de uma gaiola com os rolos de urdideira apoiados	12
Figura 3: Foto de uma caixa de goma com seus respectivos controles	12
Figura 4: Foto e Esquema de um conjunto de rolos da secadeira	13
Figura 5: Foto de um campo de separação úmido	14
Figura 6: Foto de um conjunto bobinador	14
Figura 7: Diagrama de blocos de um sistema de segunda ordem	15
Figura 8: Diagrama de forças para o rolo da gaiola.....	19
Figura 9: Diagrama de forças para o conjunto tracionador de entrada.....	21
Figura 10: Diagrama de forças para o rolo da secadeira.....	21
Figura 11: Diagrama de forças para o tracionador de saída	22
Figura 12: Diagrama de forças para o rolo enrolador/bobinador.....	23
Figure 13: Diagrama do modelo de simulação.....	33
Figura 14: Componentes que formam o tanque de nível com sensores e atuadores	36
Figura 15: Gráfico do comportamento das trações medidas pelos tensiômetros.....	40
Figura 16: Gráfico do comportamento das velocidades dos fios nos rolos comparativamente à velocidade de referência.....	41
Figura 17: Gráfico do comportamento dos atuadores Freio e Bobinador no decorrer da simulação.....	41
Figura 18: Gráfico que representa a transferência de massa entre os dois rolos, incluindo a variação dos raios e contagem da metragem de rolo	42
Figura 19: Gráfico que demonstra a proporcionalidade entre a velocidade média dos fios e o <i>pickup</i> de goma pelos fios.....	43
Figura 20: Gráfico do comportamento das diversas variáveis que influem no controle de nível por faixa de histerese.....	43
Figura 21: Gráfico do comportamento do controle PI de temperatura para um ganho proporcional e integral de 0.1 e 1, respectivamente	44
Figura 22: Gráfico do comportamento do controle PI de temperatura para um ganho proporcional e integral de 100 e 0.1, respectivamente	44
Figura 23: Gráfico do controle PI de temperatura com atraso	45

1. Introdução

A engomagem é um processo intermediário na indústria têxtil que consiste basicamente em aplicar uma fina camada de goma (amido de milho) sobre os fios recém criados, com sua posterior secagem, conferindo-lhe uma resistência adicional. Isto é feito uma vez que a etapa seguinte, a tecelagem, submete os fios a condições extremas de atrito e tração.

Atualmente, indústrias têxteis de grande porte sofrem de problemas na operação de suas engomadeiras. Como a engomagem é um processo intermediário na fabricação de qualquer produto têxtil, sua operação eficiente é de fundamental importância para redução dos custos e ampliação dos lucros da empresa.

Entre os principais problemas apresentados por estas máquinas, podemos citar:

- Ruptura excessiva dos fios;
- Excesso de umidade final dos fios;

Entretanto, devido aos altos custos de aquisição e manutenção de engomadeiras, têm-se dificuldades no desenvolvimento de pesquisas por parte de universidades no que se refere ao seu controle e operação.

O objetivo deste trabalho consiste na criação de um modelo matemático de simulação de uma engomadeira industrial de grande porte e seu respectivo modelo de controle e operação, visando à otimização do processo de engomagem. Conseqüentemente, objetiva-se desenvolver um software executável que incorpore estes modelos citados.

O desenvolvimento de um modelo matemático de simulação, controle e operação de uma engomadeira permitirá que estudantes do Centro de Engenharia Elétrica e Informática (CEEI) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) possam desenvolver, a baixos custos, soluções criativas e inovadoras para a otimização da operação e do controle destas máquinas.

Estes conhecimentos poderão, posteriormente, serem aplicados por centros industriais têxteis, aumentando a eficiência da produção com a redução de custos excessivos, como em desperdícios de matéria prima e energia elétrica. Isto baratearia os produtos finais, proporcionando um bem para a sociedade como um todo.

2. Etapas de desenvolvimento

Um projeto dessa magnitude exige uma disciplina no seu desenvolvimento. Dessa forma, há etapas a serem seguidas na realização do projeto, desde sua concepção até a plena simulação. As etapas são dispostas a seguir:

- Descrição do sistema:
 - Definir o funcionamento do sistema global
 - Definir o funcionamento do hardware do sistema individualmente
- Modelagem do sistema a ser controlado:
 - Modelagem individual do hardware descrito na etapa anterior
 - Simplificação para facilitar simulação
- Definir as especificações de desempenho e operação
 - Definir o modo de operação inicial
 - Definir as limitações de hardware
 - Estimar os parâmetros do hardware
- Definir o tipo de controlador a ser utilizado
 - Definir o tipo de controle: malha aberta ou fechada, redes neurais, adaptativo, inteligência artificial, etc.
- Projeto do controlador
 - Projeto das malhas de controle PID e operações de controle
 - Definir os parâmetros do controlador
- Simulação computacional
 - Implementação do modelo computacional de simulação
 - Sintonizar os parâmetros do hardware do sistema físico a fim de retratá-lo da forma mais realista possível
- Validação do controlador
 - Sintonizar os parâmetros do controlador
 - Verificar os resultados das simulações

Uma vez que o objetivo deste trabalho é a simulação computacional de um sistema de controle e operação de uma engomadeira, não serão detalhados os equipamentos que o formam. Será focado no entendimento do funcionamento do sistema como um todo, dispensando conceitos puramente técnicos.

3. Descrição do Sistema

3.1. Definição de Engomagem

A engomagem é o tratamento prévio dos fios de urdume (cru ou tinto) para que estes resistam aos atritos e as tensões fortes a que são expostos durante o processo de tecelagem, alcançando um grau de eficiência na produção.

Ao se engomar, cuja tarefa é também a colagem das fibras, forma-se uma estrutura que proporciona uma superfície lisa e resistente ao atrito no fio. A elasticidade e o poder de alongamento dos fios devem permanecer inalterados, visto haver uma dependência entre estes e as rupturas dos fios posteriormente na tecelagem.

A superfície dos fios deve ser bem lisa, a fim de manter o mais baixo possível o coeficiente de atrito. Só esta já diminui uma grande parte dos esforços mecânicos, por ocasião da tecelagem.

Uma engomadeira industrial de grande porte é o equipamento utilizado para realizar a engomagem. Esta máquina, apresentada na Figura 1, pode ser subdividida em regiões com características específicas, detalhados posteriormente. Estas regiões são citadas a seguir:

- Gaiola
- Caixa de Goma
- Zona de Secagem
- Campo de Separação a Seco
- Bobinador

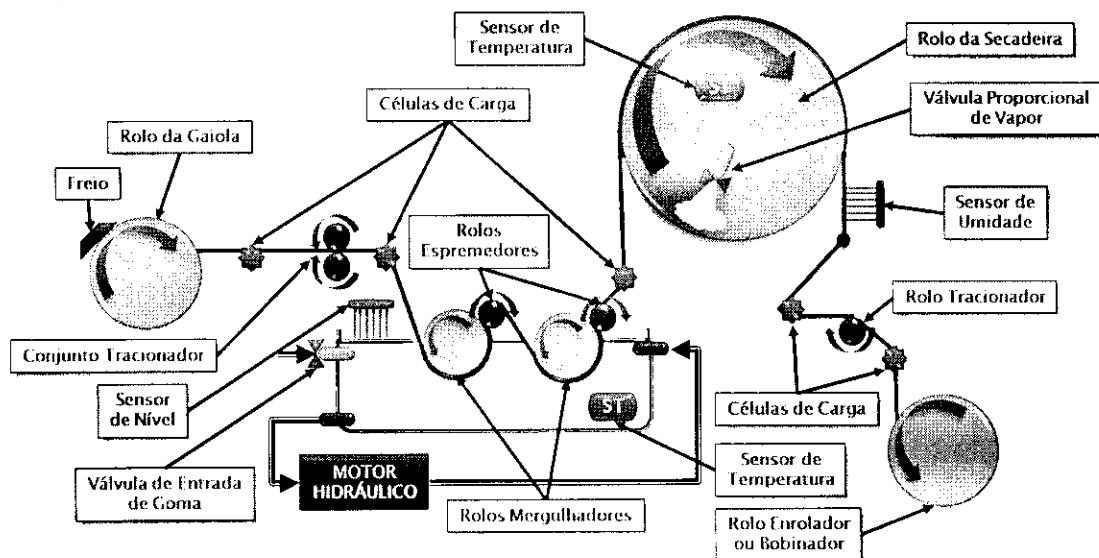


Figura 1: Esquema dos elementos constituintes de uma engomadeira industrial de grande porte

3.2. Gaiola

A gaiola é uma estrutura metálica que apóia os rolos de urdideira, ou seja, os rolos com os fios recém produzidos que irão passar pela engomagem, como pode ser visto na Figura 2. Os rolos são alinhados e enfileirados de modo que os fios de vários rolos sejam engomados de cada vez. Para grandes engomadeiras a gaiola pode levar até 20 rolos de urdideira, dispostos precisamente paralelos, de modo a não gerar zonas de maior tensão.

Cada rolo na gaiola possui um freio pneumático. Este freio impede que em uma desaceleração súbita dos fios na engomadeira, o rolo na gaiola não continue, por inércia, a se desenrolar à mesma velocidade que antes. Isto provocaria o relaxamento demasiado dos fios, que é prejudicial ao processo.

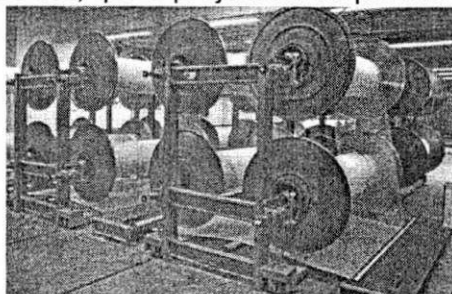


Figura 2: Foto de uma gaiola com os rolos de urdideira apoiados

3.3. Caixa de Goma

Ao saírem dos rolos da gaiola, os fios são puxados a seco para a próxima etapa do processo através de um conjunto de dois rolos puxadores. Estes rolos puxadores consistem em dois cilindros revestidos de borracha, cuja disposição é mostrada na Figura 1, e sua velocidade é controlada por motor.

Entre o conjunto dos rolos da gaiola e o conjunto puxador, os fios correm sobre uma célula de carga (tensiômetro), que consiste em um sensor que mede a tração pelo qual os fios estão submetidos.

Ao serem puxados pelo conjunto puxador, os fios são levados à caixa de goma. Esta pode ser descrita como um recipiente prismático retangular em que está contida a goma (basicamente amido de milho ou mandioca misturado à água), matéria prima para a engomagem. A temperatura e o nível da goma na caixa, medidos respectivamente por termopar e sensor de nível, são controlados pelos seguintes atuadores: válvula on/off para regular o nível de goma, resistência aquecedora e bomba de circulação para regular sua temperatura. Os componentes da caixa de goma podem ser vistos detalhadamente na Figura 1. Uma foto de uma caixa de goma de uma engomadeira é mostrada na Figura 2.

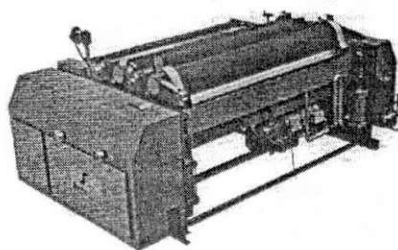


Figura 3: Foto de uma caixa de goma com seus respectivos controles

Dentro da caixa, os fios são imersos na goma por um par de rolos imersores, também chamados de mergulhadores. Estes rolos situam-se a certo nível dentro da goma, de modo ao fio receber goma em ambos os lados.

Na caixa de goma há dois rolos impregnadores/espremedores. Cada par consiste em um rolo revestido de borracha, disposto de modo que no primeiro, após os fios serem mergulhados pela primeira vez, são então espremidos, retirando o excesso de ar de dentro das fibras. Posteriormente, os fios são novamente mergulhados pelo segundo rolo mergulhador, absorvendo melhor a goma entre as fibras. São então

espremidos pelo segundo rolo espremedor, agora com o intuito de eliminar o excesso de goma.

3.4. Zona de Secagem

Depois de revestidos e impregnados com a goma da caixa, os fios seguem bem esticados, através de *varetas de separação a úmido* (pentes que separam os fios um dos outros para que não se unam) e sobre uma célula de carga, para os rolos da secadeira. Estes rolos são responsáveis por extrair a umidade dos fios, de modo a garantir a sua resistência e ser enrolado eficientemente.

Os rolos da secadeira possuem um controle pneumático de temperatura através de válvulas proporcionais que, por sua vez, injetam vapor de água nas paredes internas do cilindro, aquecendo-o como um todo. A temperatura é medida através de um sensor de temperatura instalado dentro de cada rolo.

Na secadeira, geralmente utilizam-se quatro ou mais rolos, dispostos de modo a aquecer o maior comprimento possível de fios, como pode ser observado na Figura 4.

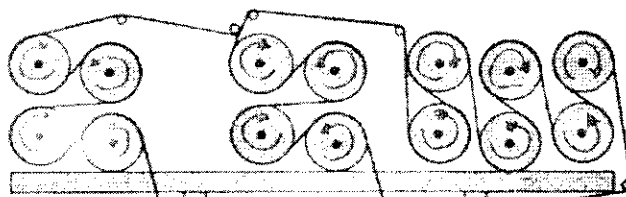
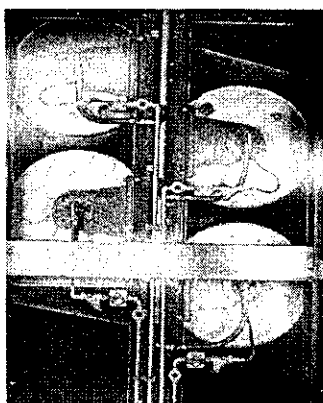


Figura 4: Foto e Esquema de um conjunto de rolos da secadeira

3.5. Campo de Separação a Seco

Depois de passar pelos rolos da secadeira, a umidade remanescente nos fios engomados é medida através de um sensor de umidade. Esta medição é de extrema importância para o controle de qualidade dos fios engomados.

Uma vez engomados, os fios são submetidos a uma tração bem mais elevada, medida por uma célula de carga, e são então puxado por um rolo puxador de saída revestido em borracha. Esta etapa pode ser observada na Figura 5.

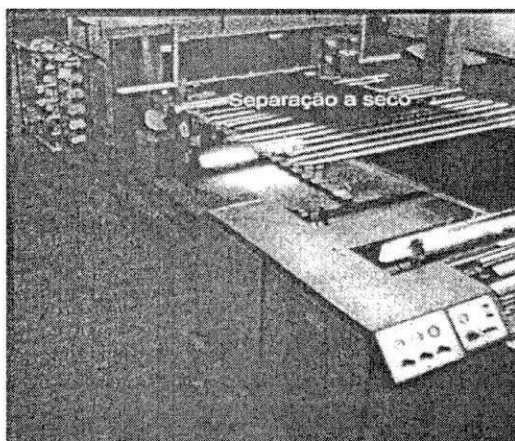


Figura 5: Foto de um campo de separação úmido

3.6. Bobinador

Ao serem puxados, os fios são enrolados no rolo bobinador, passando antes sobre uma célula de carga.

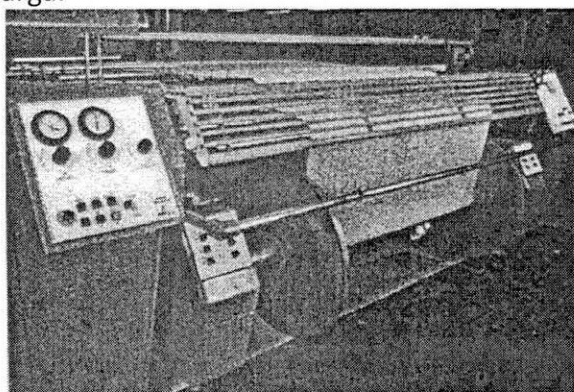


Figura 6: Foto de um conjunto bobinador

Ao finalizar o processo de enrolamento do rolo bobinador, a engomagem se completa e os rolos enrolados são levados a outras etapas da produção têxtil.

3.7. Células de Carga ou tensiômetros

As células de carga ou tensiômetros, como mostrado na Figura 1, são sensores que medem a tração pelo qual os fios estão submetidos, geralmente dispostos entre dois atuadores tracionadores.

Estes sensores são de fundamental importância no controle de tração nos fios por parte dos atuadores, evitando com isso os fios se romperem e mantendo a qualidade final dos fios.

4. Modelagem dos Componentes da engomadeira

4.1. Considerações Iniciais

Para a modelagem de sistemas eletromecânicos de alta complexidade, é boa prática subdividir o sistema em vários subsistemas fisicamente independentes. Assim, modelam-se cada subsistema em separado, valendo-se de modelos físicos já conhecidos.

Para uma rápida simulação computacional, é preciso aproximar o comportamento físico visando à simplificação, desde que o erro gerado por esta aproximação seja tolerável.

Recorremos a conhecimentos das mais diversas áreas da engenharia que são de fundamental importância para o entendimento desta modelagem, e que serão brevemente apresentados em seguida.

Ao modelar os rolos pelos quais os fios percorrem na engomadeira, o interesse é buscar uma expressão numérica para determinar a velocidade angular de rotação do rolo em função do tempo. Assim, ao atuarem torques variados sobre o rolo, determinaremos a velocidade do rolo em qualquer instante de tempo.

4.1.1. Dinâmica de Movimentos Rotacionais

Momento de inércia de um corpo cilíndrico:

O momento de inércia J de um corpo cilíndrico pode ser dado pela seguinte equação:

$$J = C \cdot r^2$$

Onde r é o raio do cilindro e C é uma constante que depende da massa do cilindro, e que pode ser determinada empiricamente.

Segunda lei de Newton para o movimento de rotação:

$$\sum \tau = J \cdot \alpha$$

Onde $\sum \tau$ é o torque resultante sobre um corpo e α é sua aceleração angular.

4.1.2. Sistemas de 2ª Ordem

Um sistema de 2ª ordem é dado basicamente pelo seguinte diagrama de blocos:

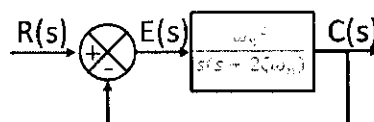


Figura 7: Diagrama de blocos de um sistema de segunda ordem

Este diagrama pode ser representado pela seguinte função de transferência:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Onde ω_n é a frequência natural de oscilação do sistema e ζ é o seu fator de amortecimento.

$0 = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$ é chamado de equação característica. Os zeros desta equação correspondem aos dois pólos da função de transferência de malha fechada. No caso sobre-amortecido, estes dois pólos são reais, negativos e distintos.

Assim, para uma entrada degrau unitário $R(s) = 1/s$, a saída $C(s)$ pode ser escrita como:

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})(s + \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})s}$$

No domínio do tempo, aplicando a transformada inversa de Laplace, teremos:

$$c(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left(\frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2} \right) \quad (t \geq 0)$$

Onde $s_1 = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$ e $s_2 = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$

4.1.3. Funções com Atraso

Funções com atraso são ações que envolvem retenção da entidade por algum período de tempo.

A engomadeira funciona com um fluxo contínuo de fios. Considere uma variável, por exemplo, que depende diretamente de dados da temperatura em certo ponto de uma etapa anterior distante “ d ” metros em trajetória de fio da etapa atual. Uma vez visto que para velocidades dos fios acima de certo limite, as variações percentuais de velocidade são desprezíveis, de modo a se tornarem irrelevantes perante a distância total que o fio percorre no interior da máquina. Assim, poderemos considerar, para efeitos de simplificação, que a velocidade “ v ” vista em qualquer ponto do trajeto é constante durante certo intervalo de tempo. Portanto no caso do sensor, a temperatura utilizada no instante atual será igual à temperatura medida em um tempo $(t - \tau)$ anterior:

$$S(t) = T(t - \tau)$$

$$\tau = \frac{d}{v}$$

4.1.4. Sistemas Amostrados

A amostragem é um processo de discriminação temporal de sinais contínuos. Assim, pode-se simular o processo através de computadores digitais, processando com base em iterações, de modo a simular equações diferenciais.

Quanto menor o tempo de amostragem h , maior precisão será obtido na simulação, entretanto o tempo real total de simulação aumentará.

Sistemas amostrados são o fundamento para o cálculo numérico de variáveis.

4.1.5. Cálculo numérico de variáveis de controle

O Cálculo Numérico tem por objetivo estudar esquemas numéricos (algoritmos numéricos) para resolução de problemas que podem ser representados por um modelo matemático.

As aplicações em cálculo numérico são largamente utilizadas em diversos processos da engenharia. Sua utilização vai desde aplicações para determinação de raízes de equações, passando por interpolação de valores tabelados, até integração numérica entre outros. Desta forma, torna-se cada vez mais comum a necessidade de programar tais aplicações para a resolução de problemas do cotidiano do profissional da área de engenharia.

A simulação do modelo a ser desenvolvido envolverá conceitos de cálculo numérico.

4.1.6. Nomenclatura das variáveis e constantes

As variáveis utilizadas nas demonstrações usam-se nomenclaturas comuns à maioria das bibliografias. Uma variável que é função do tempo é seguida posteriormente de um “(t)”. Assim, entre as principais variáveis utilizadas, podemos citar:

- $v(t)$: Velocidade dos fios do rolo considerado;
- r : Raio do rolo considerado (pode ou não ser em função do tempo);
- $\omega(t)$: Velocidade angular do rolo considerado;
- $\alpha(t)$: Aceleração angular do rolo considerado;
- $F(t)$: Força de qualquer natureza;
- P : Peso do rolo;
- N : Força normal aos mancais de sustentação do rolo considerado;
- m : Massa do rolo (pode ou não ser em função do tempo);
- $T(t)$: Torque de qualquer natureza:
 - $T_{\text{atrito}}(t)$: Torque relativo à força de atrito;
 - $T_{\text{motor}}(t)$: Torque relativo à força motora;
 - $T_{\text{freio}}(t)$: Torque relativo à força de frenagem;
 - $T_{\text{fios}}(t)$: Torque relativo às forças de tração $F_j(t)$ e $F_m(t)$;
- J : Momento de inércia do rolo considerado (pode ou não ser em função do tempo);

Uma especial consideração deve ser dada às constantes aqui utilizadas. Toda e qualquer constante, representado por C_n , onde n é um índice inteiro positivo qualquer, serão determinados posteriormente, ajustando-os relativamente à operação de uma máquina real, em campo.

Qualquer constante, ao realizar uma operação matemática com outra constante, gera um resultado igualmente constante. Assim, a alteração nos índices das constantes se faz freqüentemente no decorrer das demonstrações, com o intuito de reduzir ao mínimo o número de constantes a se calibrar.

4.2. Modelagem dos Sensores de Velocidade (Encoders)

Os sensores de velocidade (encoders) fornecem uma medição precisa e atualizada da velocidade angular de rotação do rolo em que está instalado. Quando o rolo possui raio constante e não há escorregamento entre o fio e o rolo, pode-se determinar a velocidade pelo qual o fio percorre o rolo:

$$v(t) = r \cdot \omega(t)$$

4.3. Modelagem das Células de Carga (Tensiômetros)

Considere uma célula de carga entre dois cilindros que impõem a velocidade dos fios em cada lado da célula de carga. Chamaremos a velocidade de cada um de v_1 e v_2 , para os dois atuadores. Considere também que o fio passe primeiramente com uma velocidade v_1 por um cilindro, posteriormente pela célula de carga e finalmente com uma velocidade v_2 pelo segundo cilindro. Sabe-se que as duas velocidades v_1 e v_2 são muito próximas entre si e que os fios possuem certa elasticidade, evitando-os de romper facilmente. Sabe-se também que quanto maior a média de velocidade aplicada nos dois cilindros, maior é a tração medida pela célula de carga.

Considere uma situação em que a velocidade v_2 é ligeiramente maior que a velocidade v_1 . Neste caso, o fio vai se esticando até atingir seu limite de elasticidade, rompendo-se em seguida. Assim, a célula de carga vai medir uma tração crescente no decorrer do tempo. Esta forma de onda pode ser aproximada por uma rampa. Assim,

$$v_2 > v_1$$

$$T_{fio} = T_0 + T_v + C1 \int_0^t [v_2(\sigma) - v_1(\sigma)] d\sigma$$

Onde T_{fio} representa a tração sobre o fio. T_0 representa a tração inicial estática sobre o fio. T_v é a tração proporcional à média entre as velocidades v_1 e v_2 .

Considere agora a velocidade v_1 ligeiramente maior que a velocidade v_2 . Neste caso, o fio vai se relaxando até perder o contato com a célula de carga. Assim, a célula de carga vai medir uma tração decrescente no decorrer do tempo. Esta forma de onda pode ser aproximada por uma rampa decrescente. Assim,

$$v_1 > v_2$$

$$T_{fio} = T_0 + T_v - C1 \int_0^t [v_2(\sigma) - v_1(\sigma)] d\sigma$$

Assim, a mesma equação vale para o segundo caso. Resta-nos determinar a tração inicial T_v no fio.

Como o aumento na tração é diretamente proporcional à média entre as velocidades v_1 e v_2 . Assim, podemos fazer:

$$T_v = C2(v_1 + v_2)$$

Desta forma, substituindo a equação anterior em (), obteremos:

$$T_{fio} = T_0 + C2(v_1 + v_2) \pm C1 \int_0^t [v_2(\sigma) - v_1(\sigma)] d\sigma$$

Neste modelo, estamos aproximando a reação da tração nos fios a um degrau do diferencial das velocidades v_1 e v_2 como sendo um sinal rampa. Dessa forma, desprezamos alguns efeitos não-lineares da estrutura microscópica dos fios.

Este modelo é válido desde que se mantenha o contato dos fios com a célula de carga, ou seja, enquanto $T_{fio} > 0$.

4.4. Modelagem dinâmica do rolo da gaiola com freio

Nesta modelagem, estaremos considerando que a gaiola sustenta apenas um rolo, uma vez que a modelagem dos outros rolos é praticamente igual. Assim, como esta modelagem visa à simulação de uma engomadeira, então para economizar recursos do computador, adotou-se esta aproximação.

O freio do rolo da gaiola é um atuador pneumático proporcional que tem como função principal reduzir a velocidade do rolo da gaiola quando a tensão mecânica medida na célula de carga CC1 for aquém a um valor seguro. Geralmente, o mesmo só opera a baixas velocidades.

O freio exerce uma força de atrito contrária ao sentido de rotação do rolo da gaiola de modo que seu torque é diretamente proporcional à abertura das válvulas pneumáticas.

Como pode ser visto na Figura 8, a força F devido a tração nos fios, medida pela célula de carga CC1, influencia diretamente na intensidade da força normal aos mancais de sustentação, e conseqüentemente no torque devido ao atrito.

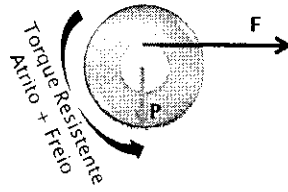


Figura 8: Diagrama de forças para o rolo da gaiola

Pelo fato de que a força peso P é muito maior do que a força F e a força resultante do freio, logo a força resistente resultante do atrito pode ser escrita como:

$$T_{\text{atrito}}(t) = \mu_c P(t)$$

Onde μ_c é o atrito cinético devido ao movimento sobre os mancais de sustentação.

Neste ponto da modelagem, é necessário lançar mão de aproximações. Uma aproximação que é preciso fazer é considerar que o rolo enrolado possui densidade constante, ou seja, não há zonas de maior ou menor compressão dentro do rolo. Sendo assim, podemos aproximar a massa total do rolo como sendo função do quadrado do raio atual da secção transversal do rolo.

$$m(t) = m_0 + C3 \cdot [r(t) - r_{\text{eixo}}]^2$$

Onde m_0 representa a massa inicial do rolo, que representa a massa de sua estrutura de ferro (inclui o eixo e os discos laterais de isolamento). r_{eixo} representa o raio da secção transversal do rolo sem fios enrolados, ou seja, apenas o que corresponde ao eixo de ferro. $r(t)$ representa o raio total da secção transversal do rolo preenchido ou não com fios. Assim, pode-se dizer que $r(t) \geq r_{\text{eixo}}$.

No rolo da gaiola, não há sensor que efetue a medição do raio do cilindro em função do tempo. Uma vez que o conjunto puxador de entrada está equipado com um sensor de velocidade (encoder), precisamos de um meio de utilizar esta informação para o cálculo do raio em qualquer instante de tempo.

O rolo da gaiola, completamente enrolado de fios, possui uma metragem D de fios e um raio máximo de r_{max} . Sabe-se também que o eixo do rolo possui um raio dado por r_{eixo} . Logo, o raio efetivamente preenchido com fios corresponde à $r_{\text{max}} - r_{\text{eixo}}$.

Sabe-se que o comprimento total dos fios do rolo é proporcional ao quadrado do raio do rolo. Assim, temos que:

$$D = C4 \cdot (r_{\text{max}}^2 - r_{\text{eixo}}^2)$$

Como o rolo da gaiola é desenrolado no decorrer do tempo, para uma distância $x(t)$ qualquer percorrida pelos fios do rolo, teremos:

$$x(t) = D - C4 \cdot [r(t)^2 - r_{\text{eixo}}^2]$$

$$x(t) = C4 \cdot [r_{\text{max}}^2 - r(t)^2]$$

Onde $r(t)$ é o raio de fios em certo instante de tempo t . A partir da equação (), o raio em função do tempo pode ser dado por:

$$r(t) = \sqrt{r_{\text{max}}^2 - \frac{x(t)}{C4}}$$

Como $x(t)$ pode ser considerado a distância acumulada que o fio percorre do instante inicial até o instante atual t , teremos:

$$x(t) = \int_0^t v(\sigma) d\sigma$$

Onde v é a velocidade do fio em função do tempo, medido através do sensor de velocidade do conjunto tracionador de entrada.

$$r(t) = \sqrt{r_{max}^2 - C5 \int_0^t v(\sigma) d\sigma}$$

Assim, determinamos o raio do cilindro a qualquer instante t em função exclusivamente da velocidade medida no sensor de velocidade. Agora a massa do cilindro em função do tempo, dado pela equação (), já pode ser determinada.

Continuando a modelagem dinâmica, encontrada a expressão para o torque que origina o atrito, determina-se o torque relativo a força $F(t)$ de tração nos fios. Sabe-se que esta força é medida pela célula de carga CC1. Assim,

$$T_{fios}(t) = r(t) \cdot F(t)$$

Como visto anteriormente nas considerações iniciais, o momento de inércia $J(t)$ de uma estrutura cilíndrica pelo qual estamos modelando depende proporcionalmente da massa e do quadrado do raio.

$$J(t) = \frac{1}{2} \cdot m(t) \cdot r(t)^2$$

Como agora conhecemos a massa e o raio do rolo em função do tempo, pode-se determinar o momento de inércia em qualquer instante de tempo.

Assim, pela segunda lei de Newton para o movimento de rotação, teremos:

$$T_{fios}(t) - T_{freio}(t) - T_{atrito}(t) = J(t) \cdot \alpha(t)$$

Onde $T_{freio}(t)$ representa o torque gerado pelo acionamento do freio pneumático em certo instante t e $\alpha(t)$ é a aceleração angular do cilindro. O sinal negativo em $T_{freio}(t)$ e $T_{atrito}(t)$ é devido ao fato de originarem-se de forças não conservativas, que se opõem ao sentido do deslocamento.

Uma vez que o raio varia em função do tempo, $\alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt}$, podemos substituí-lo na equação (), obtendo-se:

$$T_{fios}(t) - T_{freio}(t) - T_{atrito}(t) = J(t) \frac{d\omega(t)}{dt}$$

Isolando $\frac{d\omega(t)}{dt}$, obtemos:

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{T_{fios}(t) - T_{freio}(t) - T_{atrito}(t)}{J(t)}$$

Assim, a partir da equação anterior, pode-se encontrar numericamente a velocidade angular do rolo em função do tempo. A velocidade dos fios que o percorrem é dado por:

$$v(hn) = \frac{\omega(hn) \cdot r(hn)}{r(hn)}$$

Onde h é o tempo de amostragem.

4.5. Modelagem dinâmica do conjunto tracionador de entrada

O conjunto tracionador de entrada consiste em dois cilindros revestidos em borracha que puxam, sem escorregamento, os fios que saem do rolo da gaiola.

Nestes cilindros, o raio e a massa permanecem constantes, independentes dos fios que o percorrem.

Como pode ser observado na figura seguinte, os fios que percorrem o conjunto tracionador exercem tração ao entrar e ao sair do conjunto.

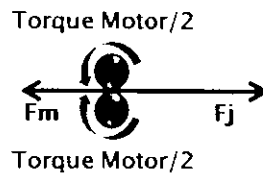


Figura 9: Diagrama de forças para o conjunto tracionador de entrada

Para simplificar a modelagem do sistema sem se tornar incoerente, aproximaremos estes cilindros a simples eixos, sem massa. Assim, o torque motor aplicado a eles implica em uma imposição de uma velocidade de rotação específica, controlável.

Desta forma, teremos que a velocidade dos fios que atravessam este rolo é dada por:

$$v(t) = C6 \cdot T_{motor}(t)$$

Onde $T_{motor}(t)$ é o torque motor aplicada aos cilindros.

4.6. Modelagem dinâmica do rolo da secadeira

O rolo da secadeira é um cilindro parcialmente oco pelo qual os fios impregnados de goma percorrem. Devido ao diâmetro, área percorrida pelos fios e o material que compõe sua superfície, podemos afirmar que não há escorregamento dos fios sobre o rolo. Assim, as trações nos fios podem ser individualizadas no diagrama de corpo livre, como mostrado na figura seguinte.

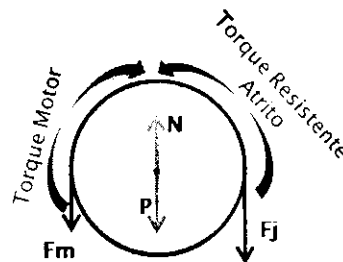


Figura 10: Diagrama de forças para o rolo da secadeira

Da mesma forma que na gaiola, ao invés de considerar na simulação a modelagem de quatro a seis rolos, utilizaremos apenas um, com suas características e capacidades ampliadas, uma vez que todos os rolos operam do mesmo modo e são ligados de modo a estarem sincronizados em velocidade.

Sabendo-se que a força peso P do rolo é muito maior que as forças de tração nos fios, podemos aproximar a força normal ao cilindro à força peso para fins de simplificação.

$$T_{atrito}(t) = \mu_c P(t)$$

O torque resultante das trações dos fios é dado por:

$$T_{fios}(t) = C7(F_j(t) - F_m(t))$$

Como a massa e o raio do rolo da secadeira permanecem constantes (aproximação), pela segunda lei de Newton para movimentos de rotação, teremos:

$$T_{motor}(t) - (T_{fios}(t) - T_{atrito}(t)) = J \cdot \alpha(t)$$

Onde $T_{motor}(t)$ é o torque motor e $T_{atrito}(t)$ é o torque resistente exercida pela força de atrito. O momento de inércia é constante, uma vez que o raio e a massa do rolo permanecem constantes. Assim, o restante da modelagem assemelha-se aos anteriores, obtendo, assim:

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{T_{motor}(t) - T_{fios}(t) - T_{atrito}(t)}{J}$$

Assim, a equação diferencial acima representa a velocidade angular do rolo em função do tempo e pode ser resolvida numericamente.

4.8. Modelagem dinâmica do rolo tracionador de saída

A modelagem do rolo tracionador de saída, mostrada na Figura 11, é semelhante à modelagem do conjunto tracionador de entrada.



Figura 11: Diagrama de forças para o tracionador de saída

Assim, a velocidade imposta pelo tracionador é dada por:

$$v(t) = C8.T_{motor}(t)$$

4.9. Modelagem dinâmica do rolo enrolador

A modelagem do rolo enrolador é semelhante à modelagem do rolo da gaiola, com algumas sutis diferenças. Entre elas está o fato de, ao contrário do rolo da gaiola, os fios serem enrolados, influenciando no cálculo do raio do cilindro no decorrer do tempo. Assim, como a comprimento total de fios enrolados em um determinado instante de tempo é proporcional ao quadrado do raio total, teremos:

$$x(t) = C9.[r(t)^2 - r_{fio}^2]$$

Isolando-se $r(t)$, obteremos:

$$r(t) = \sqrt{r_{fio}^2 + \frac{x(t)}{C9}}$$

Da mesma forma que no rolo da gaiola, $x(t)$ pode ser considerado a distância acumulada que o fio percorre do instante inicial até o instante atual t , teremos:

$$x(t) = \int_0^t v(\sigma) d\sigma$$

Onde v é a velocidade do fio em função do tempo, medido através do sensor de velocidade do rolo tracionador de saída.

$$r(t) = \sqrt{r_{fio}^2 - C10 \int_0^t v(\sigma) d\sigma}$$

A partir da Figura 12, pode-se observar que a força de tração F exercida pelos fios sobre o rolo enrolador influencia diretamente na intensidade da força normal exercida pelos mancais de sustentação. O torque provocado pela força de atrito, proporcional à força normal, é dada por:

$$T_{atrito}(t) = C11[P - F(t)]$$

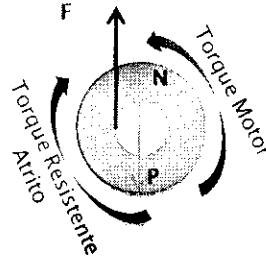


Figura 12: Diagrama de forças para o rolo enrolador/bobinador

Uma aproximação aqui é feita considerando-se que o ângulo que a força de tração $F(t)$ faz com a vertical é nula, independente da variação do raio. Esta aproximação é tolerável quando consideramos que a distância entre o rolo enrolador e o rolo tracionador de saída é consideravelmente maior que o raio do rolo enrolador.

Assim, o restante da modelagem, no que se refere à aplicação da segunda lei de Newton para movimentos de rotação, assemelha-se à modelagem do rolo da gaiola, ou seja:

$$T_{motor}(t) - T_{fios}(t) - T_{atrito}(t) = J(t)\alpha$$

Isolando $\frac{d\omega}{dt}$, obtemos:

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{T_{motor}(t) - T_{fios}(t) - T_{atrito}(t)}{J(t)}$$

Assim, a partir da equação anterior, pode-se encontrar numericamente a velocidade angular do rolo em função do tempo. A velocidade dos fios que o percorrem é dado por:

$$v(hn) = \frac{\omega(hn)r(hn)}{r(hn)}$$

Onde h é o tempo de amostragem.

4.10. Modelagem termodinâmica do rolo da secadeira

Ao aplicar um degrau na válvula de vapor do rolo da secadeira, a temperatura no rolo da secadeira varia de acordo com uma função de segunda ordem, onde o fator de amortecimento ζ é diretamente proporcional à velocidade dos fios pelo rolo, uma vez que quanto maior a velocidade, mais calor é transferido para os fios. O fator de amortecimento também é proporcional ao *pickup* de goma pelos fios, uma vez que quanto maior a quantidade de goma nos fios, mais calor é transferido para evaporar a água contida na solução de amido.

Assim, a temperatura no rolo é dada por:

$$\varphi(t) = \varphi_{max} \left[1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left(\frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2} \right) \right] \quad (t \geq 0)$$

Onde $s_1 = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$ e $s_2 = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$ e $\zeta = C12.v(t)$

4.11. Modelagem da caixa de goma

A caixa de goma consiste em um tanque preenchido com goma por onde os fios são mergulhados e engomados. Há dois parâmetros que devem ser controlados para a manutenção da qualidade do processo na caixa, que serão posteriormente discutidos em mais detalhes:

- Nível do tanque
- Temperatura da goma

4.11.1. Nível como variável de estado

Para medir o valor do nível do tanque, dispõe-se de um sensor de nível que fornece este valor. Uma vez que o tanque possui um formato prismático, conhecendo-se a área de sua secção transversal, pode-se determinar o volume do tanque em qualquer instante de tempo.

Ao serem mergulhados no tanque, os fios absorvem goma a uma taxa que dependerá principalmente da velocidade dos fios e do grau de aperto do conjunto espremedor ao espreme-los. Esta relação se dá devido ao fato de que, para manter a qualidade do processo de engomagem, a taxa de goma absorvida por metro de fio deve permanecer aproximadamente constante.

Para que o processo se perpetue, a goma precisa ser restabelecida no tanque. Isto é feito por uma válvula de dois estados que transfere goma de um reservatório "inesgotável" para o tanque em questão. Ao acionar a válvula, o tanque é preenchido a uma taxa constante.

A modelagem da vazão que a válvula de dois estados gera pode ser dada por:

$$Q(t) = Q_{v\grave{a}lv} \cdot \beta(t) \quad \text{onde } \beta(t) = \begin{cases} 0, & \text{se a válvula está fechada} \\ 1, & \text{se a válvula está aberta} \end{cases}$$

Onde $Q(t)$ é a vazão produzida pela válvula em um determinado instante de tempo, $Q_{v\grave{a}lv}$ é a capacidade de vazão da válvula e $\beta(t)$ é uma variável binária que representa a abertura ou o fechamento da válvula em um determinado instante de tempo.

Assim, o volume do tanque em um determinado tempo é dado por:

$$V(t) = V_0 - C_{13} \cdot T_{espr}(t) \int_0^t v(\sigma) d\sigma - \int_0^t Q(\sigma) d\sigma$$

Onde V_0 é o volume inicial de goma no tanque, $v(t)$ é a velocidade que os fios percorrem dentro da caixa de goma e $T_{espr}(t)$ representa a pressão pelo qual os fios são espremidos, eliminando o excesso de goma dos fios. Ao dividir o volume $V(t)$ pela área da secção transversal A , acha-se o nível de goma em função do tempo.

Uma variável utilizada posteriormente e muito importante para a medição da qualidade da engomagem é o *pickup* $\delta(t)$, que pode ser resumida como o volume de goma consumida por metro de fio utilizado. Essa variável pode ser determinada integrando o volume em função do tempo e dividindo pela integral da velocidade neste mesmo intervalo de tempo. Assim, teremos:

$$\delta(t) = \frac{\int_0^t V(\sigma) d\sigma}{\int_0^t v(\sigma) d\sigma}$$

Para manter a qualidade da engomagem, é importante que o *pickup* seja mantido constante, uma vez que a quantidade de goma absorvida pelos fios não deve variar durante o processo.

4.11.2. Temperatura como variável de estado

Para que os fios possam ser engomados eficientemente, a goma deve ser constantemente aquecida para se manter em estado fluido. Para aquecer esta goma,

utiliza-se uma resistência no fundo do tanque cuja capacidade de transferência de calor varia em função da corrente que o percorre.

Uma vez que a goma é espessa e de lenta convecção, utiliza-se uma bomba que transfere, a uma taxa constante, a goma localizada no fundo do tanque para a parte superior do tanque, de modo a manter um movimento cíclico da goma no seu interior, homogeneizando a temperatura da goma no tanque e aumentando a confiabilidade dos valores medidos pelo termopar.

Este processo pode ser realisticamente aproximado por um sistema de segunda ordem sobre-amortecido com atraso de transporte.

Para simplificar o desenvolvimento do controlador e para economizar tempo computacional, suporemos que a temperatura nos tanques seja mantida constante, uma vez que desejamos nos ater ao controle de velocidade e também pelo fato de que a resistência aquece de modo variável em função da intensidade da corrente que o atravessa, sendo assim de simples controle.

4.12. Modelagem do Sensor de Umidade

O sensor de umidade tem seu valor diretamente influenciado principalmente pelas seguintes grandezas:

- Taxa de absorção da goma *pickup* (ρ)
- Velocidade (v)
- Temperatura nos rolos da secadeira (φ_{RS})

Quanto maior a taxa de absorção da goma, maior a umidade final dos fios, mantendo a temperatura e a velocidade constantes.

Uma velocidade maior dos fios implica em menos tempo atravessando os rolos da secadeira, o que faz aumentar o valor da sua umidade.

Quanto maior a temperatura nos rolos da secadeira, mais rápido evaporará a água contida na goma, e conseqüentemente, menor será a sua umidade.

O desafio está em encontrar a relação exata que cada um desses fatores contribui para a alteração da umidade.

Inicialmente, modelaremos o sensor de umidade da seguinte maneira:

$$H(t) = K \frac{v(t) \cdot \rho(t - \tau_p)}{\varphi_{RS}(t - \tau_\varphi)}$$

Onde $v(t)$ é a velocidade atual dos fios da engomadeira. $\varphi_{RS}(t - \tau_\varphi)$ representa a temperatura dos rolos da secadeira quando da passagem dos fios. O tempo que decorre entre a passagem dos fios pelos rolos da secadeira até o sensor de umidade consiste em um atraso τ_φ . $\rho(t - \tau_p)$ representa a *pickup* quando da passagem dos fios pela caixa. Da mesma forma, com um atraso de tempo de τ_p . K é uma constante utilizada para considerar os efeitos não-lineares referentes ao tipo e número de fios utilizados, normalizando também os valores da umidade para valores coerentes com a escala do sensor. Se, para velocidades maiores dos fios, considerarmos a velocidade dos fios constante durante todo seu percurso pela máquina, podemos determinar τ_φ e τ_p simplesmente a partir das distâncias d_φ e d_p que o fio percorre entre o sensor e o rolo da secadeira e do sensor e o conjunto espremedor, respectivamente. Assim,

$$\tau_\varphi = \frac{d_\varphi}{v} \quad \text{e} \quad \tau_p = \frac{d_p}{v}$$

5. Especificações de Operação

As especificações de operação refletem as limitações pelas quais os componentes do sistema precisam estar submetidos para operarem de modo seguro e eficiente.

5.1. Fios

Antes de iniciar a engomagem, é de extrema importância que se saiba o tipo dos fios a serem engomados e algumas de suas propriedades, além de informações sobre os rolos. Entre elas:

- Tipo de fio: Cada tipo de fio possui uma resistência diferente à tração. Esta resistência deve ser conhecida para cada etapa da engomagem;
- Quantidade de fios por rolo (Devido à simplificação anteriormente mostrada, apenas simularemos um rolo na gaiola e um rolo da secadeira): Esta informação influi diretamente na faixa de valores de tração pelo qual os fios podem ser submetidos;
- Limite de tração do fio seco: Em grandes indústrias, laboratórios testam os fios de cada lote para verificar sua tolerância à tração, indicando a tração máxima a seco que o fio suporta sem se romper. Esta informação, embora não necessária, é valiosa para elevar a eficiência da produção.

5.2. Gaiola

Na simulação, será feita apenas a modelagem de um rolo da gaiola, que por sua vez possui um freio pneumático com ação proporcional. O freio apenas atua positivamente, ou seja, desacelerando o rolo.

5.3. Especificação de operação da caixa de goma

O número máximo de fios a entrar na caixa de goma para ser engomado depende do diâmetro dos mesmos, e deverá haver sempre entre cada fio e seu vizinho, uma distância igual ao seu diâmetro.

5.3.1. Nível da goma

O nível da goma deve ser mantido com um mínimo de oscilação. Este nível fica aproximadamente à altura da linha axial do rolo metálico inferior. Às vezes é interessante manter o nível tão baixo quanto possível para facilitar a manutenção da alta temperatura da goma dentro do tanque.

5.3.2. Temperatura da goma

A temperatura da goma deve ser mantida com um mínimo de oscilação, entre 95°C e 100°C (levemente borbulhante), pois para temperaturas menores, a goma tende a formar um gel.

A temperatura deve ser mantida na caixa de goma, bem como também na panela de reserva, bem alta.

5.3.3. Rolos Impregnadores-Espremedores

O pressionamento dos rolos espremedores sobre os impregnadores deve ocorrer de modo controlado e preferencialmente constante para certa velocidade, para não haver variações na resistência dos fios pós-engomagem.

A pressão de espremedura, ao aumentar, quando da passagem da marcha lenta para a marcha normal, ou ao diminuir, quando da passagem da marcha normal para a marcha lenta, deverá fazê-lo gradualmente, acompanhando as variações de velocidades.

5.4. Zona de Secagem

A temperatura nos cilindros secadores deve variar gradualmente, para evitar migração diferenciada da goma em diferentes partes dos fios.

5.5. Bobinamento

Os fios devem ser enrolados com uma tensão compatível com sua resistência. Esta tensão deverá ser uniforme em todo o comprimento e largura do rolo de fios e nunca deverá ultrapassar o limite elástico dos fios para que não haja estiramento (alongamento), mesmo na condição de já secos.

6. Controle e operação

6.1. Problemas mais frequentes

Atualmente, as indústrias têxteis vêm enfrentando sérios problemas no controle e operação de engomadeiras de grande porte. Sua grande complexidade e a infinidade de variáveis de controle ainda são objeto de diversos estudos na área.

Painéis de controle envolvem uma imensa variedade de componentes que para alguns, são necessários mais de cinco quilômetros de cabos para interligar todo o sistema.

Diante dessa complexidade, surgem problemas crônicos que interferem diretamente na eficiência e qualidade do processo de engomagem. Entre estes problemas, podem-se citar:

- **Ruptura dos fios:** Este problema pode ter origem de vários fatores, como travamento de rolamentos dos cilindros, baixa resistência mecânica dos fios ou grandes divergências entre as velocidades aplicadas aos fios por diferentes rolos. A ruptura dos fios em uma engomadeira pode acarretar em mais de 8 horas para a recolocação da máquina em funcionamento, resultando em perdas de produção.
- **Excesso de umidade final dos fios:** Problemas ao se controlar a velocidade dos fios e a temperatura das secadeiras podem ocasionar umidade excessiva dos fios, resultando em perda de qualidade, podendo até comprometer a operação na etapa posterior ao da engomagem, a tecelagem.
- **Operação aquém da capacidade máxima:** Este problema está diretamente relacionado com a falta de sintonia entre os atuadores de rolos distintos, o que obriga a operar a máquina em velocidade aquém da velocidade máxima suportada pelos fios.

Estes problemas podem ser resolvidos com um controlador robusto e adaptativo, que será detalhadamente descrito a seguir.

6.2. Controle adaptativo

Controle adaptativo é a denominação atribuída à ação de controle de sistemas capazes de modificar seus próprios parâmetros em resposta a alterações verificadas em algum módulo que esteja sendo monitorado. Neste sentido, adaptar-se significa mudar o comportamento em resposta a novas circunstâncias de operação, com o objetivo de manter um nível esperado de desempenho.

Sistemas de controle adaptativo são caracterizados pela existência de duas malhas de realimentação: malha de controle convencional e malha de adaptação, responsável por monitorar o desempenho e ajustar os parâmetros do controlador de acordo com as condições de operação em vigor.

Este sistema de controle será escolhido para o desenvolvimento do controlador da engomadeira.

6.3. Descrição do Controlador

O principal desafio ao desenvolver um eficiente sistema de controle é garantir uma produção contínua e o mais rápida possível, cuja qualidade e segurança das operações permaneçam dentro dos limites das especificações desejadas. Deseja-se que o controlador seja simples, uma vez que este controle será feito por um CLP

(Controlador Lógico Programável) que, por sua vez, tem recursos limitados de processamento.

Para isso ser alcançado, utilizaremos um sistema de controle adaptativo onde dividiremos a engomadeira em malhas com controladores PI (Proporcional e Integral) operando em paralelo com malhas de ajuste dos parâmetros dos controladores PI, realizando o controle adaptativo.

6.4. Controle de tração baseado na medição da célula de carga CC1

Quando os fios deixam a gaiola, estes são muito frágeis e não podem ser submetidos a tensões elevadas, uma vez que ainda não foram engomadas. Entretanto, os fios também não podem estar relaxados, o que implica em seu entrelaçamento, situação que pode ser irreversível após a engomagem, resultando comumente no seu rompimento.

Uma vez que os fios não sofrem qualquer escorregamento no conjunto tracionador de entrada (rolos prensados de borracha), a tração medida pela célula de carga CC1 entre a gaiola e o conjunto tracionador independe de processos posteriores. Assim, para simplificar o controlador, a célula de carga CC1 em associação com o atuador responsável pelo freio do rolo da gaiola forma um sistema de controle em malha fechada isolada do restante do processo. Essa estratégia de isolamento é adotada como forma de reduzir o tamanho do controlador e facilitar a depuração de erros no sistema de controle, uma vez que se evita o envolvimento de uma gama extensa de variáveis.

A ação de controle é exercida pelo freio pneumático proporcional instalado no rolo da gaiola. Ao frear o rolo da gaiola, aumenta-se a tração sobre os fios, que é imediatamente detectado pela célula de carga CC1.

O controlador selecionado foi um proporcional integral simples. A escolha deste controlador foi devido ao fato de não permitir erro em regime permanente e uma vez que a maioria dos controladores lógicos programáveis (CLP's) o possui em sua biblioteca de comandos.

Para esta malha de controle, existe uma faixa de valores de referência em que a tração nos fios medida pela célula de carga pode se situar, sem comprometer a qualidade nem a segurança especificada para esta etapa, dado por $T_{refMIN} \leq T_{CC1}(t) \leq T_{refMAX}$. Nesta faixa de valores, o erro entre a tração medida pela célula de carga e a tração de referência (faixa de valores) é nula, logo a ação de controle não se altera. A vantagem de se dispor de uma margem de segurança ao invés de um valor único de referência permite um maior espaço de manobra para que se atinjam especificações críticas em outras áreas da engomadeira.

Em engomadeiras mais antigas, não há a célula de carga CC1, o que obriga o controle da intensidade da frenagem sendo proporcional ao diâmetro do rolo de urdideira.

O controlador possui seus parâmetros definidos com base na velocidade de resposta desejada. A sintonia do controlador será vista posteriormente.

Na prática, o freio só é acionado em baixas velocidades de operação, ou em uma operação de desaceleração da engomadeira, uma vez que para maiores velocidades,

o próprio atrito resistente dos mancais de sustentação mantém uma tração tolerável nos fios.

Equacionando o controlador, obteremos:

$$e_T(t) = \begin{cases} T_{refMAX} - T_{CC1}(t), & \text{se } T_{CC1}(t) > T_{refMAX} \\ T_{refMIN} - T_{CC1}(t), & \text{se } T_{CC1}(t) < T_{refMIN} \\ 0, & \text{se } T_{refMIN} \leq T_{CC1}(t) \leq T_{refMAX} \end{cases}$$

$$C(t) = T_{freio}(t) = K_P \left[e_T(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e_T(\sigma) d\sigma \right]$$

Onde $C(t) = T_{freio}(t)$ representa a ação de controle sobre o atuador do freio do rolo da gaiola. K_P é o parâmetro ganho proporcional, τ_i é a constante de tempo da ação integral e $e_T(t)$ é o erro de tração dos respectivos controladores. O freio também possui a restrição de que não pode operar negativamente, ou seja, $T_{freio}(t) \geq 0$.

6.5. Controle de tração baseado na medição da célula de carga CC2

Os fios puxados pelo conjunto tracionador de entrada seguem para o rolo mergulhador, passando antes sobre a célula de carga CC2. Os fios ainda são muito frágeis e não podem ser submetidos a trações elevadas. Após serem mergulhados na goma, os fios são espremidos pelo conjunto espremedor que, do mesmo modo que o conjunto tracionador de entrada, não oferece escorregamento aos fios. Assim, a tração medida pela célula de carga CC2 independe da tração em outras etapas do processo como um todo, podendo assim isolar seu controle em malha fechada.

A função do conjunto espremedor é extrair o excesso de goma dos fios mergulhados, através da pressão de espremedura do rolo espremedor sobre o rolo mergulhador, por onde passam os fios.

Assim, nesta malha haverá duas ações de controle: pressão de espremedura para controle de absorção de goma, e torque no tracionador de entrada para controle da tração medida pela célula de carga CC2.

A penetração de goma nos fios depende de uma série de fatores, como:

- Torção do fio;
- Hidrofilidade das fibras;
- Tração dos fios;
- Distância entre fios;
- Pressão de espremedura;
- Tempo de imersão dos fios na goma (velocidade de operação);
- Temperatura da goma;
- Viscosidade da goma;
- Tipo do fio (*open-end*/convencional).

A maioria destes parâmetros não pode ser medida durante o processo de engomagem. Geralmente, em grandes indústrias, existem laboratórios que fornecem estes parâmetros dos fios para cada lote de rolos produzido.

Como a relação destes parâmetros é altamente não-linear, utiliza-se uma tabela para determinar a pressão de espremedura em função das características dos fios e a velocidade de operação, mantendo a temperatura dos fios aproximadamente

constante. Esta prática elimina a carga computacional de processamento de equações altamente não-lineares e imprecisas.

Para simplificar a tabela, a máquina será operada em apenas três velocidades (micro-lenta, lenta e rápida), reduzindo-se assim a carga computacional. Ao passar de uma velocidade para outra, a pressão de espremedura exercida pelo rolo espremedor varia gradualmente, acompanhando as variações de velocidade. Assim, a ação de controle de pressão (torque) no conjunto espremedor é proporcional à velocidade dos fios, expresso por:

$$C(t) = T_{espr}(t) = K_P \cdot v(t)$$

Onde $C(t) = T_{espr}(t)$ é a ação de controle (torque) sobre o rolo espremedor, $v(t)$ é a velocidade dos fios em um determinado instante de tempo e K_P é uma constante extraída de uma tabela que depende das variáveis explicitadas anteriormente no que diz respeito à absorção de goma pelos fios.

Para controlar a tração dos fios entre o conjunto tracionador de entrada e o rolo espremedor, usa-se como ação de controle o atuador responsável pelo torque no conjunto tracionador de entrada. Este controle é feito em malha fechada de modo proporcional e integral, devido às mesmas razões descritas anteriormente.

Assim, a ação de controle do torque no conjunto tracionador de entrada $C(t) = T_{ConjTraccioEnt}(t)$ pode ser expressa por:

$$e_T(t) = \begin{cases} T_{rsfMAX} - T_{CC2}(t), & \text{se } T_{CC2}(t) > T_{rsfMAX} \\ T_{rsfMIN} - T_{CC2}(t), & \text{se } T_{CC2}(t) > T_{rsfMIN} \end{cases}$$

$$C(t) = T_{ConjTraccioEnt}(t) = K_P \left[e_T(t) - \frac{1}{T_i} \int_0^t e_T(\sigma) d\sigma \right]$$

6.6. Controle de tração baseado na medição da célula de carga CC3

Ao atravessarem o conjunto espremedor, os fios passam sobre célula de carga CC3 no campo de separação úmido e seguem para o rolo da secadeira. Este possui atuador próprio e não favorece o escorregamento dos fios. Assim, em associação com o conjunto espremedor e a célula de carga CC3, forma-se um sistema de controle em malha fechada independente do restante das etapas de fabricação.

Nesta malha de controle, a tração máxima aplicada aos fios é maior do que na etapa anterior, uma vez que os fios estão úmidos e preenchidos com goma. Entretanto, a importância de se manter uma tração acima de um valor mínimo se resalta, uma vez que os fios úmidos e pegajosos são facilmente aglutináveis, fenômeno este que pode se tornar irreversível, resultando em rompimento e perda em qualidade.

A ação de controle da malha em questão se limita ao atuador que determina a velocidade do rolo da secadeira. O controle de tração é feito por um controlador proporcional e integral em malha fechada que atua apenas quando a tração medida pela célula de carga CC3 superar os limites de referência pré-estabelecidos.

Equacionando, obteremos:

$$e_T(t) = \begin{cases} T_{rsfMAX} - T_{CC3}(t), & \text{se } T_{CC3}(t) > T_{rsfMAX} \\ T_{rsfMIN} - T_{CC3}(t), & \text{se } T_{CC3}(t) > T_{rsfMIN} \end{cases}$$

$$C(t) = T_{\text{secadeira}}(t) = K_p \left[e_T(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e_T(\sigma) d\sigma \right]$$

Onde $C(t) = T_{\text{secadeira}}(t)$ representa a ação de controle sobre o atuador do rolo da secadeira.

6.7. Controle de tração baseado na medição da célula de carga CC4

Ao passarem pelo rolo da secadeira, os fios passam por uma célula de carga CC4 e seguem para o rolo tracionador de saída, de onde partem para serem enrolados novamente. Nesta etapa, os fios já podem ser submetidos a elevadas trações, uma vez que a goma úmida que os encobria foi aquecida e secada, quando da passagem pelo rolo da secadeira. Assim, a faixa de valores de tração que os fios podem ser submetidos alarga-se, provendo ao controlador um grau de liberdade maior para o controle da tração.

O tracionador de saída não permite escorregamento aos fios. Juntamente com o rolo da secadeira, poderemos isolar este processo das restantes no tocante ao controle de tração medida pela célula de carga CC4.

O controlador atua sobre o motor do rolo tracionador de saída de modo proporcional e integral. A escolha do atuador do rolo tracionador de saída como elemento de retroação foi devido ao fato deste possuir um momento de inércia muito menor do que o rolo da secadeira, permitindo uma ação de controle mais rápida e eficaz. Aliado a isto, o atuador do rolo da secadeira é determinante para outra malha de controle, como foi visto anteriormente.

6.8. Controle de tração baseado na medição da célula de carga CC5

Ao passarem pelo rolo tracionador de saída, os fios passam por uma célula de carga CC5 e são enrolados no rolo enrolador, finalizando o processo da engomagem. Para se enrolar os fios de forma eficaz e econômica, é preciso tracionar os fios em níveis próximos aos seus limites físicos, uma vez que quanto mais bem prensados os fios no rolo, maior a economia de rolos e ainda atendem-se as exigências de qualidade para as próximas etapas da fabricação de produtos têxteis.

A ação de controle se dará através do atuador do rolo enrolador de modo proporcional e integral, uma vez que o atuador do rolo tracionador de saída está comprometido com outra malha de controle.

7. Simulação Computacional

7.1. Modelo Numérico Utilizado para Simulação

Uma simulação de controle de velocidade de uma engomadeira, por representar um sistema muito complexo para estudos iniciais, seja pelo excesso de variáveis seja pela falta de dados coerentes e confiáveis, foi simplificada de modo a representar apenas a malha de controle de velocidade de maior importância na engomadeira.

A figura seguinte representa o modelo de simulação.

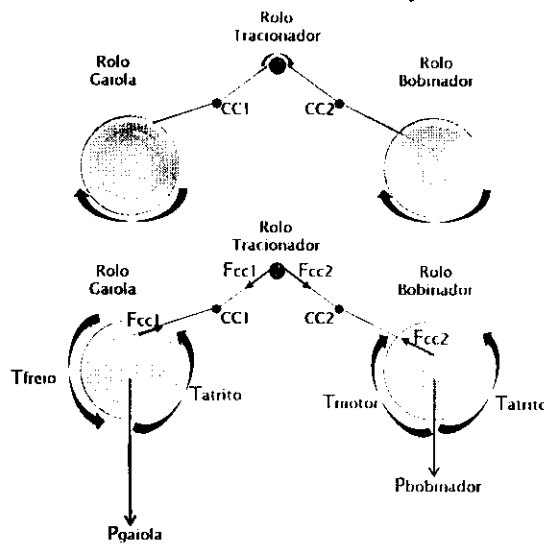


Figure 13: Diagrama do modelo de simulação

Para isto, usaram-se dois rolos de fios, um desenrolador ou gaiola (esquerda) e um enrolador ou bobinador (direita). O rolo da gaiola ou desenrolador, como o próprio nome indica, desenrola os fios, reduzindo seu peso e raio à medida que é desenrolado. O rolo enrolador ou bobinador enrola os fios, compactando-os de modo que seu peso e raio se elevem à medida que é enrolado.

Entre ambos os rolos antes mencionados está um rolo tracionador, que puxa os fios do rolo da gaiola e os encaminha ao rolo bobinador, como ocorre diversas vezes na engomadeira. Entre este rolo tracionador e os dois rolos de gaiola e bobinador mencionados, há duas células de carga (tensiômetros) que medem, por sua vez, a tração imposta pelos rolos nos fios que os atravessam.

Nos rolos com atuador, ou seja, o rolo bobinador e o rolo tracionador, há sensores de velocidade para medirem as velocidades dos fios nos rolos.

Outra aproximação feita foi o fato de que a força peso dos rolos é muito maior que as forças de tração nos fios. Desta forma, a força normal considerada na força de atrito depende apenas do peso do rolo, independentemente das forças de tração nos fios.

7.1.1. Rolo desenrolador ou de gaiola

O rolo de gaiola inicialmente está preenchido com os fios que serão desenrolados. Este rolo possui massa e raios pré-determinados. Para atuar sobre este rolo, o mesmo é dotado de um freio pneumático proporcional controlável. Este freio é útil para evitar que o rolo seja demasiadamente desenrolado quando há uma súbita redução na velocidade dos fios. Não há sensores para medir o peso nem o raio

dos rolos. Isto é feito indiretamente através de outros parâmetros que estão sendo constantemente medidos.

Para manter uma contagem da quantidade de fio desenrolado a um determinado instante, podemos dizer que a o acréscimo de fio desenrolado a cada período de amostragem é igual à velocidade dos fios multiplicado pelo período de amostragem. Assim, teremos que:

$$Metragem(t + T) = Metragem(t) + v_{tracionador}(t) \cdot T$$

Determinaremos agora a massa do rolo $M(t)$ em função do tempo, massa esta que determina o peso do rolo e conseqüentemente o momento de inércia e a força de atrito nos mancais. Esta massa pode ser determinada através do produto da diferença entre o comprimento total dos fios C_{fios} e a metragem $Metragem(t)$ pelo produto da densidade linear μ_{fios} dos fios e o número de fios por rolo $N_{fios\ por\ rolo}$ somada à massa do eixo do rolo M_{eixo} . Assim, teremos:

$$M(t) = \mu_{fios} \cdot N_{fios\ por\ rolo} \cdot [C_{fios} - Metragem(t)] + M_{eixo}$$

Para determinar o raio $R(t)$ do rolo desenrolador em função do tempo, temos vimos anteriormente que a massa $M(t)$ do rolo varia com o quadrado do raio do rolo. Inversamente, o raio do rolo variará com a raiz quadrada de sua massa. Como temos o valor da massa em função do tempo, logo:

$$R(t) = \sqrt{\frac{M(t) - M_{eixo}}{K} + R_{eixo}^2}$$

K é um coeficiente de conversão de unidade que é sintonizada tendo-se como base o raio inicial $R_{inicial}$ do rolo desenrolador. Assim, K é dado por:

$$K = \frac{C_{fios} \cdot \mu_{fios} \cdot N_{fios\ por\ rolo}}{R_{inicial}^2 - R_{eixo}^2}$$

Com o raio $R(t)$ e a massa $M(t)$ em função do tempo, podemos determinar o momento de inércia do rolo cilíndrico maciço, dado por:

$$J_m(t) = \frac{1}{2} M(t) \cdot R(t)^2$$

O torque $T_{fios}(t)$ devido à tração dos fios medida pela célula de carga CC1 é dado pelo produto da tração $F_{CC1}(t)$ pelo raio do rolo $R(t)$ naquele instante:

$$T_{fios}(t) = F_{CC1}(t) \cdot R(t)$$

O torque $T_{atrito}(t)$ devido à força de atrito é dado pelo produto do peso $9,8M(t)$ do rolo, o coeficiente de atrito μ_{atrito} e o raio $R(t)$ do rolo em determinado instante de tempo:

$$T_{atrito}(t) = \mu_{atrito} \cdot 9,8 \cdot M(t) \cdot R(t)$$

A aceleração angular $\alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt}$ será dado como função da diferença entre o torque devido à força de tração dos fios $T_{fios}(t)$ e os torques devidos ao atrito e à força freio:

$$\alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{T_{fios}(t) - T_{atrito}(t) - T_{freio}(t)}{J_m(t)}$$

Como o período diferencial de tempo dt é numericamente igual ao período de amostragem T , logo podemos encontrar a velocidade angular $\omega(t + T)$ em função do tempo:

$$\omega(t + T) = \omega(t) + d\omega(t) \cdot T$$

É nesta expressão onde está uma das grandes vantagens de se utilizar um mecanismo numérico para a resolução de equações diferenciais.

Como a velocidade $v(t - T)$ linear dos fios é igual à velocidade angular $\omega(t - T)$ do rolo multiplicado pelo seu raio $R(t)$ atual, teremos:

$$v(t + T) = \omega(t + T) \cdot R(t)$$

7.1.2. Rolo Tracionador

O rolo tracionador é um rolo de pequeno diâmetro que possui um atuador que impõe uma velocidade específica aos fios que o atravessam, assim como são diversos estes rolos em uma engomadeira, como já foi visto anteriormente. Para que uma velocidade de referência seja imposta diretamente pelo seu atuador, consideramos que este rolo não possui inércia, ou seja, não possui massa. Esta aproximação pode ser feita uma vez que é muito grande a diferença entre os tamanhos dos rolos bobinador e de gaiola em relação ao rolo tracionador.

7.1.3. Rolo Bobinador

O rolo bobinador inicialmente não possui fios, ou seja, seu peso se restringe a apenas sua estrutura de ferro. Este rolo possui um motor que impõe um torque controlado sobre o rolo de modo a manter uma determinada compressão dos fios no rolo.

Deste modo, as equações numéricas relativas a este rolo são semelhantes ao rolo desenrolador, com algumas sutis diferenças.

A primeira diferença é que a massa $M(t)$ do rolo em função do tempo independe do comprimento total C_{fios} dos fios, uma vez que o rolo inicia totalmente desenrolado. Assim, a equação numérica da massa do rolo é dada por:

$$M(t) = \mu_{fios} \cdot N_{fios\ por\ rolo} \cdot Metragem(t) - M_{fixo}$$

O torque $T_{fios}(t)$ devido à tração dos fios medida pela célula de carga CC2 é dado pelo produto da tração $F_{CC2}(t)$ pelo raio do rolo $R(t)$ naquele instante:

$$T_{fios}(t) = F_{CC2}(t) \cdot R(t)$$

A segunda diferença está no fato de que a aceleração angular $\alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt}$ será dado como função da diferença entre o torque motor bobinador e a soma do torque devido à força de tração dos fios $T_{fios}(t)$ e os torques devidos ao atrito:

$$\alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{T_{bobinador}(t) - T_{atrito}(t) - T_{fios}(t)}{J_m(t)}$$

7.1.4. Tanque

O modelo de simulação do tanque é semelhante ao modelo original, o que pode ser observado na figura seguinte:

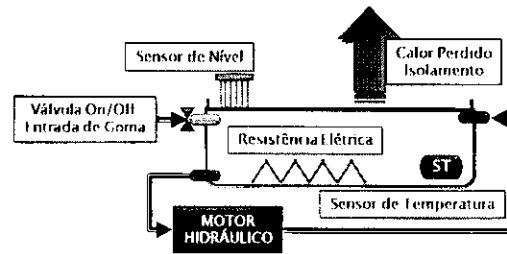


Figura 14: Componentes que formam o tanque de nível com sensores e atuadores

- Tanque (sem perfeita isolamento hermética) com goma:
- Válvula on/off para a entrada de goma:
- Sensor de nível:
- Resistência elétrica alimentada por tensão média variável:
- Sensor de temperatura:
- Motor hidráulico de circulação

Nível

O nível do tanque é calculado a partir da massa de goma no tanque em função do tempo, uma vez que a forma do tanque é cúbica e assim o volume do tanque é proporcional a massa.

Assim, a massa de goma no tanque em um determinado instante é dada pela massa de goma em um instante anterior mais um acréscimo diferencial calculado a partir do *pickup* de goma nos fios e da taxa de preenchimento do tanque com goma externa. Esta taxa de preenchimento pela válvula on/off é dada pelo produto da variável binária $valv(t)$ indicando se a válvula está aberta ou fechada pela sua vazão Z multiplicada pela densidade ρ_{goma} da goma e pelo tempo de amostragem. Assim, teremos:

$$m(t + T) = m(t) + [-N_{fios} \cdot Pickup + valv(t) \cdot Z \cdot \rho_{goma}] \cdot T$$

Temperatura

A temperatura $\varphi_{tanque}(t + T)$ do tanque em um determinado instante é dada pela temperatura em um instante anterior mais um acréscimo diferencial calculado a partir do balanço de potência sendo absorvida $P_{abs}(t - \tau_{atraso})$ (com atraso) e transferida P_{perdas} devido à falta de isolamento pelo tanque.

Sabe-se que a potência absorvida para o tanque é igual à potência dissipada pela resistência elétrica no fundo do tanque, dado por $\frac{V^2}{R}$. Sabe-se também que a potência perdida dissipada pela falta de isolamento térmica do tanque é aproximadamente constante.

O acréscimo diferencial de temperatura é dado então pela diferença entre as potências absorvida e transferida pelo tanque dividida pelo produto da massa $m(t)$ atual de goma pelo seu calor específico c , sendo o resultado multiplicado pelo tempo de amostragem T . Assim, a equação numérica ficará da seguinte maneira:

$$\varphi_{tanque}(t + T) = \varphi_{tanque}(t) + \left[\frac{P_{abs}(t - \tau_{atraso}) - P_{perdas}}{c \cdot m(t)} \right] \cdot T$$

O atraso na potência absorvida pelo tanque ocorre devido ao tempo necessário para que esta potência seja absorvida e uniformizada no tanque, com o auxílio da bomba hidráulica, que constitui um dos atuadores do sistema.

7.2. Controle de Velocidade

Neste sistema, não há controle de velocidade. Assim, a velocidade do sistema é imposta pelo tracionador.

7.3. Controle de Tração

Como já foi visto anteriormente, pelo fato de que o rompimento dos fios é considerado como uma das maiores dificuldades encontradas pelos engenheiros, o controle de tração se torna o modo mais eficaz para contornar essas dificuldades.

Para desenvolver um controle eficaz de tração, é preciso definir os atuadores responsáveis por este controle. No caso desta simulação, os principais atuadores do sistema são o motor bobinador do rolo bobinador e o freio pneumático do rolo da gaiola. Desta forma, uma tração muito alta em CC1 pode exigir que o freio seja reduzido. Da mesma maneira, uma tração muito alta em CC2 demandaria que o motor bobinador reduza seu torque.

Cabe decidir que modo estes atuadores agirão conforme as mudanças na tração medida pelas células de carga.

7.3.1. Modelo do Controlador

Para explicar o formato do controlador, é preciso compreender como funciona o elemento integral de controle intrínseco ao sistema.

Supomos um sistema mais simples, de apenas dois rolos iguais estruturalmente ao rolo tracionador, impondo velocidades individuais aos fios que os atravessam.

Suponha que inicialmente as velocidades impostas por cada um destes rolos fossem iguais e que houvesse uma tração constante diferente de zero nos fios entre os rolos.

A partir de um determinado instante, o rolo que puxa os fios impõe uma velocidade 10% maior que a velocidade do outro rolo. Assim, a tração nos fios cresce com a integral da diferença entre as velocidades dos fios em cada rolo.

Podemos perceber que o sistema possui intrinsecamente um controle integral de tração.

Para complementar este controle, usamos um controlador proporcional externo para manter um controle adicional sobre a tração dos fios. Nestes sistemas, é importante manter a tração dentro de uma faixa positiva para ao mesmo tempo manter a qualidade dos fios e impedir que os fios se rompam.

O valor do erro $e(t)$ entre a tração atual $F_{CC}(t)$ e a faixa de valores seguros de tração é feita da seguinte forma:

- Se o valor da tração atual for menor que o valor mínimo de tração permitida, o erro será dado por:

$$e(t) = F_{max}(t) - F_{CC}(t)$$

- Se o valor da tração atual for maior que o valor máximo de tração permitida, o erro será dado por:

$$e(t) = F_{min}(t) - F_{CC}(t)$$

Os valores máximos e mínimos de tração são considerados variáveis uma vez que esta faixa de limites altera-se em função de outras variáveis, como a velocidade dos fios, por exemplo. Isto é a base para o controle adaptativo.

Assim, a ação de controle proporcional desenvolvida pelo atuador $T_{atuador}(t+T)$ será dada por:

$$T_{atuador}(t+T) = T_{atuador}(t) + K_{Proporcional} \cdot e(t) \cdot T$$

Esta ação de controle é válida tanto para a ação do freio quanto para a do motor bobinador.

7.4. Controle no Tanque

O controle no tanque é basicamente de dois tipos:

- Controle de Nível;
- Controle de Temperatura.

7.4.1. Controle de Nível

O controle de nível foi desenvolvido utilizando uma faixa de histerese que representa a faixa de valores de operação. Esta faixa se deve ao fato de que os rolos mergulhadores, como o próprio nome, devem estar mergulhados na goma para que os fios absorvam a goma eficientemente. Assim, controlador opera sobre a válvula on/off da seguinte maneira:

- Se o valor de nível atual for inferior ao limite mínimo de histerese, então a válvula on/off será ligada para encher o tanque;
- Se o valor de nível atual for superior ao limite máximo de histerese, então a válvula on/off será desligada para que o tanque não transborde;

7.4.2. Controle de Temperatura

O controle de temperatura, semelhante ao controle de tração, utiliza uma faixa de histerese para calcular o erro de temperatura. Aplica-se, contudo, um controlador proporcional e integral para atuar no controle de temperatura alternando a tensão média aplicada à resistência elétrica aquecedora.

O valor do erro $e(t)$ entre a temperatura atual $\varphi_{atual}(t)$ e a faixa de valores seguros de tração é feita da seguinte forma:

- Se o valor da temperatura atual for menor que o valor mínimo de temperatura permitida, o erro será dado por:

$$e(t) = \varphi_{max} - \varphi_{atual}(t)$$

- Se o valor da temperatura atual for maior que o valor máximo de temperatura permitida, o erro será dado por:

$$e(t) = \varphi_{min} - \varphi_{atual}(t)$$

Assim, a ação de controle proporcional e integral desenvolvida pela resistência $V_{resistencia}(t+T)$ será dada por:

$$Vm_{res}(t+T) = Vm_{res}(t) + \left[K_{Prop} \cdot e(t) + K_{Int} \cdot \int_0^t e(\sigma) d\sigma \right] T$$

8. Resultados de Simulação

As simulações foram feitas no ambiente de desenvolvimento do Matlab (Mathworks) em dois programas plenamente independentes, anexados ao final do trabalho. Um dos programas, intitulado de “EngomadeiraTracao.m”, simula o controle de tração do modelo de simulação descrito anteriormente. O outro programa, intitulado de “EngomadeiraTanque.m”, simula o tanque de goma para exercer controle de seu nível e temperatura.

No programa “EngomadeiraTracao.m”, alguns recursos não foram utilizados como, por exemplo, a ação adaptativa do controle. Este recurso permite alterar o nível mínimo e máximo de tração permitida em ambos os rolos em função da velocidade atual dos fios. Da mesma forma, no programa “EngomadeiraTanque.m”, as margens de histerese são adaptáveis mas, diferentemente do programa de controle de tração, esses parâmetros permanecem constantes numa engomadeira real, uma vez que a margem de temperatura e nível são pré-definidas pelo tipo de goma e pela posição dos rolos no interior do tanque, respectivamente.

8.1. Simulação de Controle de Tração

Ao fazermos a simulação de controle de tração, utilizamos os seguintes dados de simulação:

- Duração da Simulação: 1500 segundos;
- Período de Amostragens: 10 milisegundos;
- Comprimento total dos fios: 100 metros;
- Número de fios por rolo: 800;
- Densidade Linear dos fios: 10 g/(metro de fio);
- Raio inicial do rolo da gaiola: 1.01 metros;
- Raio do eixo do rolo da gaiola e bobinador: 10 centímetros;

A partir do primeiro gráfico, que pode ser observado em seguida, observa-se que as trações medidas pelas células de carga oscilam em uma frequência natural muito alta para os padrões mecânicos. Isto ocorre devido ao alto ganho de tração que impus sobre a velocidade diferencial entre dois rolos distintos. Assim foi feito devido ao baixo limite de elasticidade dos fios, somado à atuação integral intrínseca ao sistema, geram-se oscilações em alta frequência.

Nesta simulação o valor mínimo e máximo das trações foi mantido constante para efeitos de simplificação.

Observa-se que a tração medida pela célula de carga CC1 busca manter-se na faixa de valores seguros. No final da simulação, a queda para zero da tração em CC1 se deve ao fato de que o rolo desenrolador de gaiola chegou ao final dos fios.

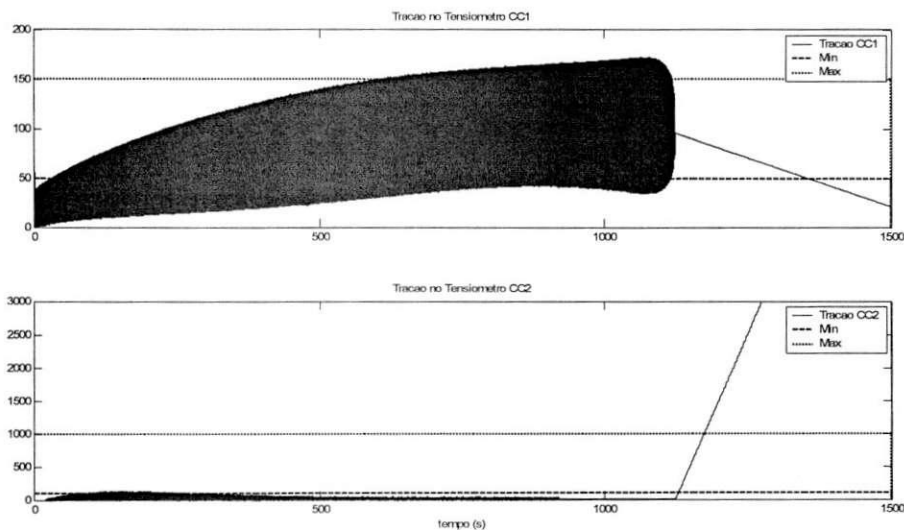


Figura 15: Gráfico do comportamento das trações medidas pelos tensiômetros

Na figura seguinte, pode-se observar o comportamento das velocidades periféricas dos fios nos rolos.

Esta simulação foi feita de modo que a velocidade dos fios nos rolos elevasse lentamente (em rampa) até a velocidade máxima. Ao final decrescesse lentamente (em rampa) até parar, de forma que os fios sejam protegidos contra súbitas mudanças de velocidade.

O primeiro gráfico indica a velocidade imposta em simulação pelo tracionador sobre os fios, ou seja, será a velocidade de referência para os fios que passam pelos outros rolos.

No segundo e terceiro gráficos, observamos o comportamento da velocidade dos fios nos rolos enrolador e desenrolador. Observa-se que a maior amplitude das variações de velocidade ocorre de forma oposta em ambos os rolos, uma vez que para o rolo de gaiola ou desenrolador, a menor massa ocorre no final do processo, elevando-se a amplitude do movimento oscilante. Já no rolo enrolador, o final do processo representa maior massa e, portanto, maior inércia, reduzindo a amplitude das oscilações.

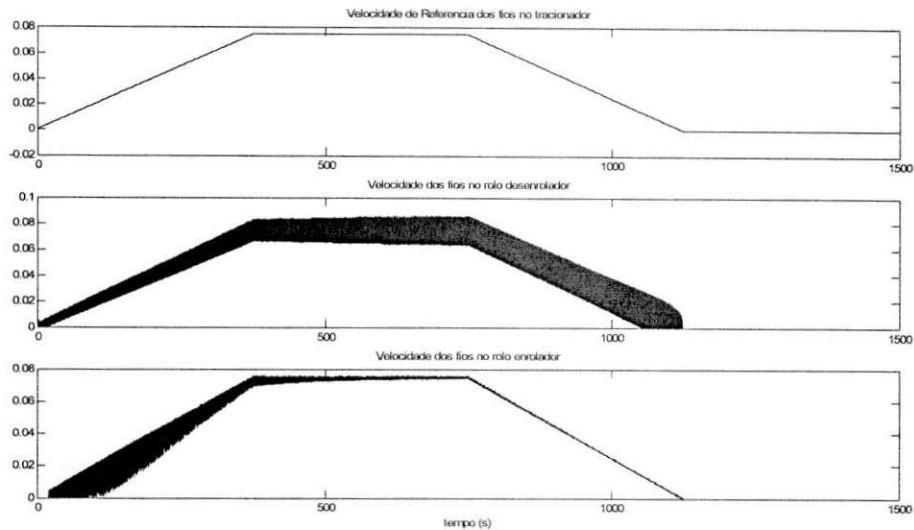


Figura 16: Gráfico do comportamento das velocidades dos fios nos rolos comparativamente à velocidade de referência

Na figura seguinte, pode-se observar o comportamento dos atuadores freio e motor bobinador no decorrer do processo visto nas figuras anteriores. Este comportamento atende às expectativas, uma vez que são atuadores mecânicos e não operam a altas frequências. A forma suave da curva da atuação de cada atuador demonstra isto.

Observa-se também que o torque aplicado pelo motor bobinador eleva-se ao elevar a velocidade do tracionador e mantendo-se enquanto a velocidade permanece constante, o que atende às expectativas reais do processo.

O atuador do freio também atende às expectativas, uma vez que esse atua de modo mais intenso ao final do processo, quando se tem uma redução de velocidade do tracionador. Para acompanhar essa redução, devido ao elevado momento de inércia destes rolos, é aplicado o freio mais intensamente.

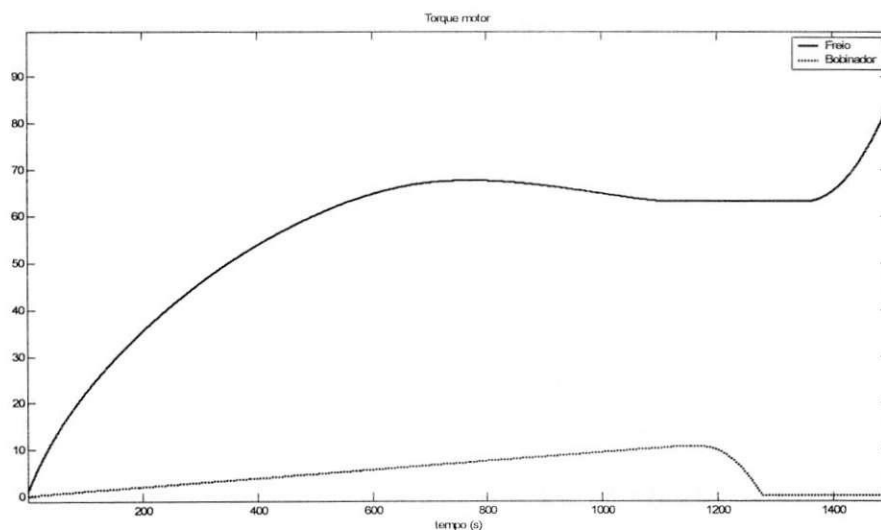


Figura 17: Gráfico do comportamento dos atuadores Freio e Bobinador no decorrer da simulação

Nesta última figura da simulação de controle de tração, vista a seguir, observa-se o comportamento dos diversos parâmetros dos rolos durante a simulação. Dentre esses parâmetros, primeiramente verificamos os raios dos rolos em função do

tempo, onde se pode observar que o raio não varia linearmente com a variação da massa, visto no segundo gráfico da mesma figura.

Observa-se também que a medição da metragem de fios em cada rolo também são aproximadamente iguais, indicando que todo o fio que passou pelo primeiro rolo (desenrolador) chegou ao segundo rolo (enrolador).

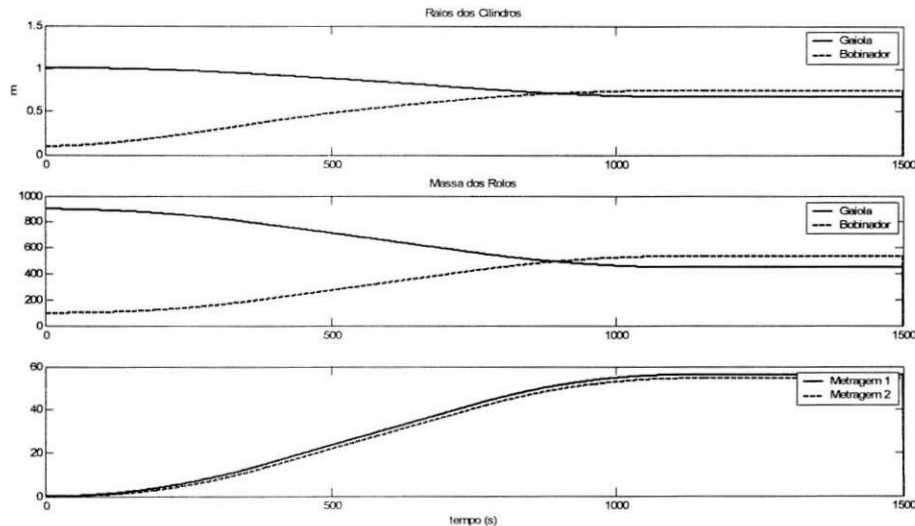


Figura 18: Gráfico que representa a transferência de massa entre os dois rolos, incluindo a variação dos raios e contagem da metragem de rolo

8.2. Simulação do Controle de Nível e Temperatura

Nesta simulação do controle de nível e temperatura, utilizaram-se os seguintes parâmetros:

- Duração da Simulação: 200000 segundos;
- Período de Amostragens: 0,2 segundos;
- Número de fios por rolo: 700;
- Resistência do Aquecedor: 10 Ohms;
- Perdas de Calor pela Isolação: 2000 W;
- Atraso de transferência de calor: 0/500s;
- Calor Específico da Goma: 10 kJ/kg.K;
- Área da Secção Transversal do Tanque: 1m²;
- Pickup: 0,1 kg/m;
- Vazão Máxima da Válvula on/off: 50 cm³/s
- Nível Máximo: 0,8m;
- Nível Mínimo: 0,6m;
- Temperatura Máxima: 97°C;
- Temperatura Mínima: 93°C;

8.2.1. Controle de Nível

A partir da figura seguinte, pode-se observar que na simulação de controle de nível e temperatura, a velocidade dos fios é variável no decorrer do tempo. Uma vez que podemos dizer, de modo aproximado, que a pickup é diretamente proporcional à velocidade média dos fios.

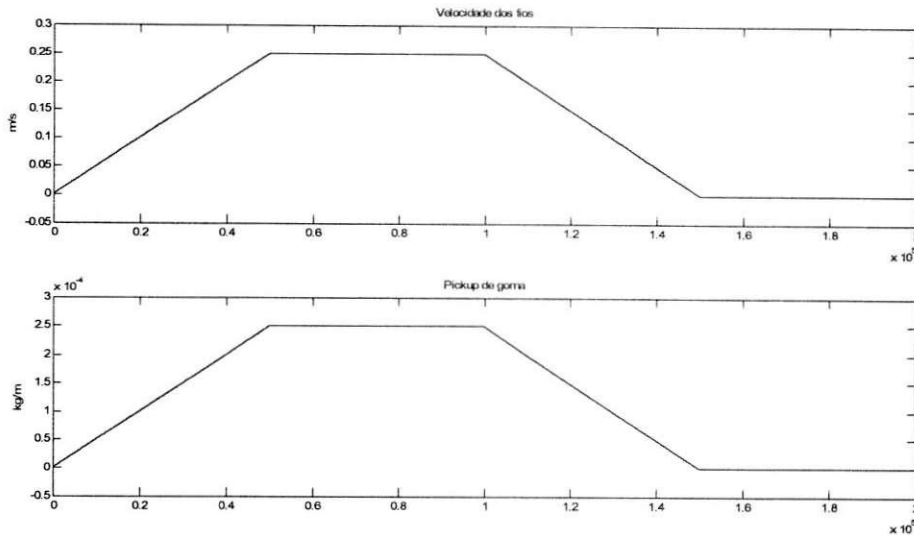


Figura 19: Gráfico que demonstra a proporcionalidade entre a velocidade média dos fios e o pickup de goma pelos fios

Na figura seguinte, observa-se o resultado de um controlador de nível para um tanque de goma. É devido ao pickup dos fios que o nível da goma cai linearmente conforme a velocidade permanece constante. No primeiro gráfico desta figura, é possível acompanhar o comportamento da velocidade e conseqüentemente o pickup. No segundo gráfico mostra-se a variação da massa de goma em função do tempo, o que também ocorre de modo semelhante ao nível, visto no terceiro gráfico, mantendo-se, portanto dentro da faixa de histerese permitida. No último gráfico percebe-se a ação de controle exercida pela válvula on/off, onde nível alto indica estado ligado e nível baixo indica o estado desligado.

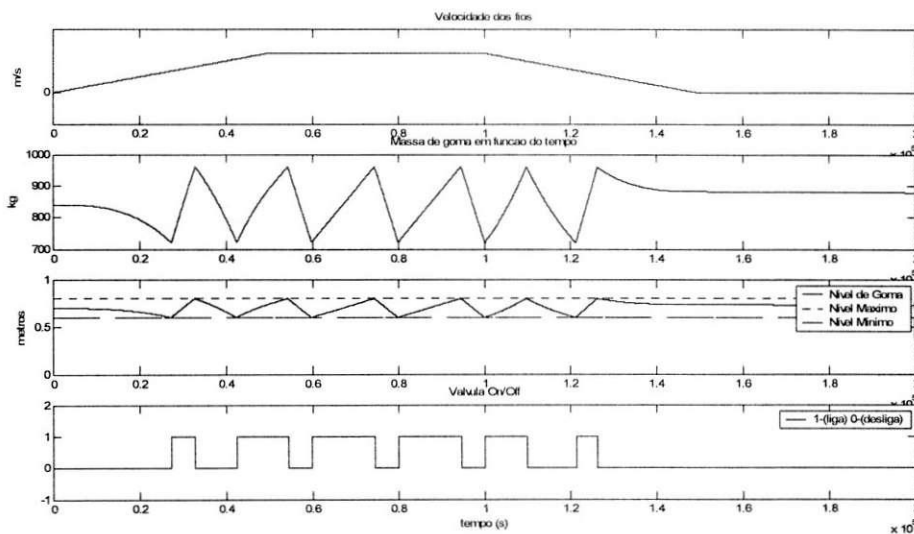


Figura 20: Gráfico do comportamento das diversas variáveis que influem no controle de nível por faixa de histerese

8.2.2. Controle de Temperatura

Na figura seguinte, observa-se como ocorre o controle de temperatura a partir da variação da tensão média aplicada à resistência. Nesta simulação, utilizou-se um ganho proporcional de 0,1 e um ganho integral unitário. Observamos com estes

ganhos que a variação da tensão média aplicada ocorre de modo binário, podendo ser utilizado quando não se pode alterar o valor médio da tensão, controlando-se assim através do chaveamento da tensão.

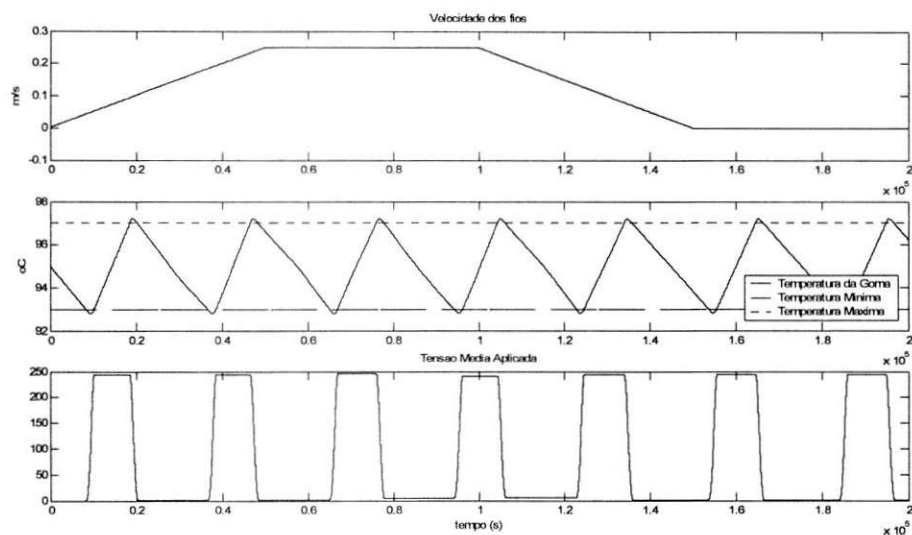


Figura 21: Gráfico do comportamento do controle PI de temperatura para um ganho proporcional e integral de 0.1 e 1, respectivamente

Para esta próxima figura, utilizou-se como ganho proporcional e integral os valores 100 e 0.1, respectivamente. Observe como o controlador converge a tensão média aplicada para um valor determinado, reduzindo-se assim as oscilações de temperatura.

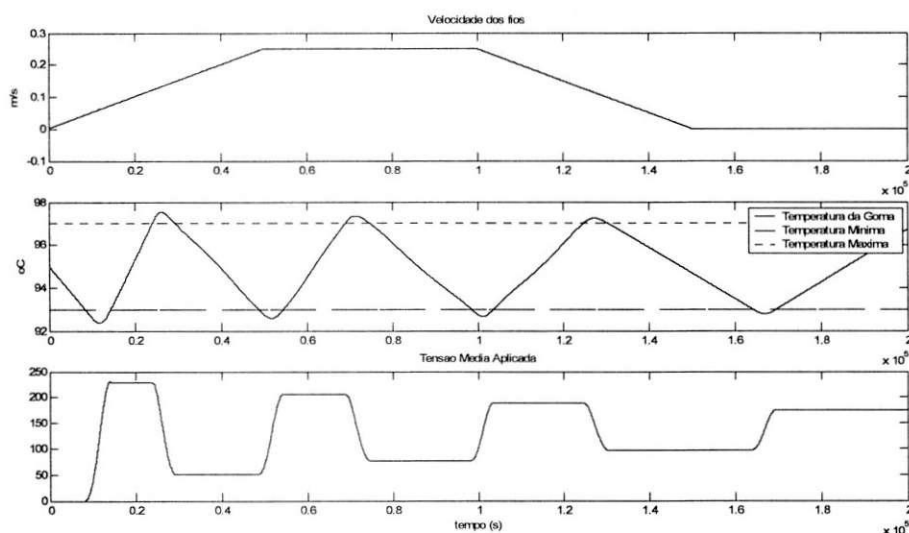


Figura 22: Gráfico do comportamento do controle PI de temperatura para um ganho proporcional e integral de 100 e 0.1, respectivamente

Na próxima figura, foi feita uma simulação do primeiro controlador considerando-se o atraso de tempo levado para que a temperatura se homogeneíze em todas as regiões do tanque. Para sistemas com atraso, controladores proporcionais e integrais comuns não são eficientes no controle, desestabilizando o sistema.

Como pode ser observado no gráfico da temperatura em função do tempo, o valor da temperatura oscila com amplitudes crescentes, inviabilizando o controle.

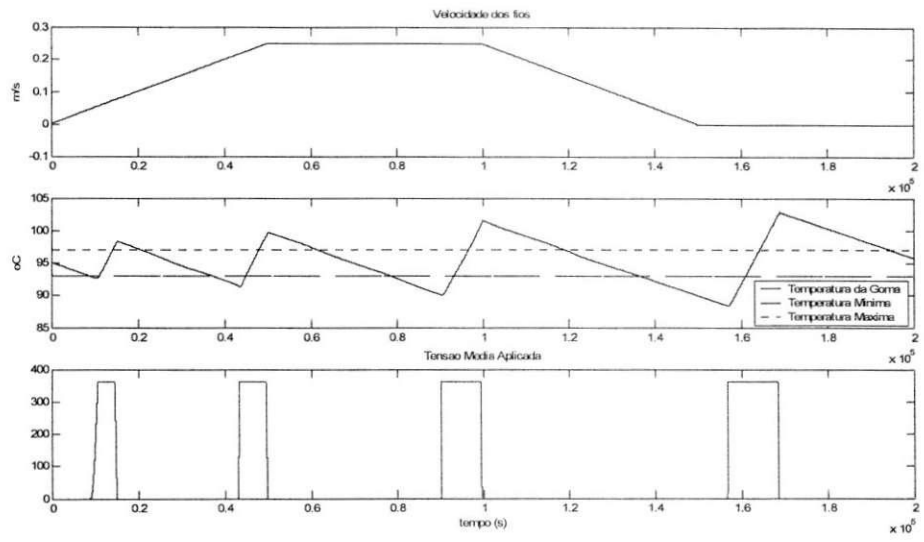


Figura 23: Gráfico do controle PI de temperatura com atraso

9. Conclusão

Neste trabalho, foi feita primeiramente a modelagem matemática de uma engomadeira industrial de grande porte, levando-se em consideração os fatores mais pertinentes para descrevê-lo de modo mais real possível. Entretanto, ao simulá-lo, a falta de dados coerentes e alta complexidade impediram que fossem obtidos resultados mais realistas para esta modelagem.

Desta forma, foi feita a modelagem de um sistema semelhante, embora mais simples, na tentativa de aos poucos agregar novos atuadores e sensores ao programa de simulação.

Assim, este trabalho não foi desenvolvido para ser individual, mas um projeto coletivo a evoluir para um modelo mais realista e confiável.

Neste trabalho, foram aplicados diversos conhecimentos de engenharia desde a modelagem matemática, até a criação de controladores capazes de manter o sistema simulado em um estado estável. Procurou-se utilizar modelos simples e confiáveis de controladores que pudessem ser embutidos em programas de CLP's (Controladore Lógico Programáveis).

10. Bibliografia

[1] PESSANHA, Daltro Rangel. Tecnologia da Engomagem – Rio de Janeiro: SENAI-CETIQT, 1986.

[2] RODRIGUES, Luís Henrique. Controles da Engomagem – Departamento de Engenharia Têxtil – FEI – Artigo.

[3] ARAÚJO, Mário de e CASTRO, E. M. Melo. Manual de Engenharia Têxtil – Fundação Calouste Gulbenkian – 1990.

Sugestões para trabalhos Futuros

O principal objetivo deste projeto de modelagem e simulação é o desenvolvimento de trabalhos futuros em processos de engomagem industrial.

- Incorporação de novos rolos na simulação de tração, de modo aos poucos expandir o sistema;
- Utilização de controle adaptativo nas faixas de histerese para os limites de tração;
- Incorporar controle de umidade e simulação dos rolos da secadeira;
- Incorporar atraso nas diversas etapas do sistema e aplicar o preditor de Smith para contorná-los;

Anexos

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
%Centro de Engenharia Eletrica e Informatica - CEEI
%Programa de Trabalho de Conclusao de Curso
%Titulo do Programa: Controle de Tracao de um Modelo
de Engomadeira Industrial de Grande Porte
%Nome do Programa: EngomadeiraTracao.m
%Autor: Wesley Catao Fadlo Curi (20311215)
%Data: 11 de Agosto de 2008
%Descricao:
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 1.0 - Limpeza de Tela, Liberacao de Memoria e
Fechamento de Janelas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
close all;
clear all;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 2.0 - Definicao das variaveis de simulacao
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

j=1; %Variavel do numero
da amostra
T=1e-2; %Periodo de
amostragem
Tsim=1500; %Tempo de simulacao
J=Tsim/T; %Numero total de
amostras
t=linspace(0,Tsim,J); %Vetor tempo

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 3.0 - Encoders de Velocidade
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

we_desenrolador=0; %Velocidade angular
do rolo desenrolador
we_tracionador=0; %Velocidade angular
do rolo tracionador
we_enrolador=0; %Velocidade angular
do rolo enrolador

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 4.0 - Definicao dos atuadores do sistema
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

TFreio=zeros(1,J); %Torque referente ao
freio no rolo desenrolador
TBobinador=zeros(1,J); %Torque referente ao
motor bobinador no rolo enrolador
VtracionadorRef=zeros(1,J); %Velocidade de
referencia imposta ao rolo tracionador

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 5.0 - Velocidades dos fios
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Vdesenrolador=zeros(1,J); %Acompanhamento da
Velocidade dos fios no rolo desenrolador
Vbobinador=zeros(1,J); %Acompanhamento da
Velocidade dos fios no rolo enrolador
Vtracionador=zeros(1,J); %Acompanhamento da
Velocidade dos fios no rolo tracionador

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 6.0 - Tracao nas Celulas de Carga
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Fccl=zeros(1,J); %Acompanhamento da
tracao na Celula de Carga CC1
Fcc2=zeros(1,J); %Acompanhamento da
tracao na Celula de Carga CC2

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 7.0 - Caracteristicas dos Rolo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

CompFios=100; %Comprimento total
dos fios no rolo (m)
NumeroFiosRolo=800; %Numero de fios em
cada rolo
DensLinearFios=10e-3; %Densidade linear
dos fios no rolo

Rinicial=1.01; %Raio maximo inicial
do rolo desenrolador/enrolador (m)
Reixo=0.1; %Raio do eixo do
rolo (m)

Meixo=100; %Massa do rolo sem
fios (kg)

Rdesenrolador=zeros(1,J); %Acompanhamento do
raio do rolo desenrolador
Renrolador=zeros(1,J); %Acompanhamento do
raio do rolo enrolador
Mdesenrolador=zeros(1,J); %Acompanhamento da
massa do rolo desenrolador
Menrolador=zeros(1,J); %Acompanhamento da
massa do rolo enrolador

Metragemdesenrolador=zeros(1,J); %Acompanhamento da
metragem do rolo desenrolador
Metragemenrolador=zeros(1,J); %Acompanhamento da
metragem do rolo enrolador

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 8.0 - Medicao Teste
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

teste1=zeros(1,J);
teste2=zeros(1,J);

teste3=zeros(1,J);
teste4=zeros(1,J);

teste5=zeros(1,J);
teste6=zeros(1,J);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 9.0 - Parametros do Controlador
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

ErroTracao=zeros(1,J);
%Acompanhamento do erro entre a tracao dos fios e a
margem de tolerancia

MaxFcc1=zeros(1,J);
%Acompanhamento da Tracao Maxima permitida para os
fios no CC1
MinFcc1=zeros(1,J);
%Acompanhamento da Tracao Minima permitida para os
fios no CC1

MaxFcc2=zeros(1,J);
%Acompanhamento da Tracao Maxima permitida para os
fios no CC2
MinFcc2=zeros(1,J);
%Acompanhamento da Tracao Minima permitida para os
fios no CC2

ErroTracaoAcum=zeros(1,J);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 10.0 - Inicializacao de Variaveis
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 11.0 - Loop Principal
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Constante que auxilia nos calculos
K=CompFios*NumeroFiosRolo*DensLinearFios/(Rinicial^2
-Reixo^2);

while j<J-1
%Atualizacao da metragem do rolo desenrolador em
funcao da velocidade do rolo desenrolador

Metragemdesenrolador(j+1)=Metragemdesenrolador(j)+Vt
racionador(j)*T;
%Atualizacao da massa do rolo desenrolador em
funcao da quantidade de fio que esta sendo
desenrolado

Mdesenrolador(j)=DensLinearFios*NumeroFiosRolo*(Comp
Fios-Metragemdesenrolador(j))+Meixo;
%Atualizacao do raio do rolo desenrolador em
funcao de sua massa
Rdesenrolador(j)=sqrt((Mdesenrolador(j)-Meixo)/K
+Reixo^2);
%Determinacao do Momento de inercia do rolo
Jm=(1/2)*Mdesenrolador(j)*Rdesenrolador(j)^2;
%Determinacao do torque devido a forca de tracao
dos fios
Tfios=Rdesenrolador(j)*Fccl(j);
%Determinacao do torque devido a forca de atrito

Tatrito=0.002*Mdesenrolador(j)*10*Rdesenrolador(j);
%Determinacao da velocidade angular de rotacao
do rolo
dw=(Tfios-TFreio(j)-Tatrito)/Jm;
we_desenrolador=we_desenrolador+dw*T;

```

```

%Determinacao da velocidade linear que os fios
percorrem na saida do rolo
Vdesenrolador(j+1)=we_desenrolador*Rdesenrolador(j);
%Limitacao da velocidade dos fios (velocidade
nao pode ser negativa)
if Vdesenrolador(j+1)<0,
    Vdesenrolador(j+1)=0;
end
%Parar quando o rolo for totalmente desenrolado
if Metragemdesenrolador(j+1)>CompFios
    Vdesenrolador(j+1)=0; end

teste1(j)=Tatrito;
teste3(j)=Tfios;
teste5(j)=Jm;

%Especificacao das Velocidades impostas pelo
Tractionador
if j<J/4
    Vtracionador(j+1)=Vtracionador(j)+0.000002;
elseif j>=J/4 && j<2*J/4
    Vtracionador(j+1)=Vtracionador(j);
elseif j>=2*J/4 && j<3*J/4
    Vtracionador(j+1)=Vtracionador(j)-0.000002;
else
    Vtracionador(j+1)=Vtracionador(j);
end

%Para o rolo enrolador, da mesma forma que o
rolo desenrolador
Metragem enrolador(j+1)=Metragem enrolador(j)+Vbobinador
or(j)*T;

Menrolador(j)=DensLinearFios*NumeroFiosRolo*(Metragem
enrolador(j))+Meixo;
%
K=CompFios*NumeroFiosRolo*DensLinearFios/(Rinicial^2
-Reixo^2);
Renrolador(j)=sqrt((Menrolador(j)-Meixo)/K +
Reixo^2);
Jm=(1/2)*Menrolador(j)*Renrolador(j)^2;
Tfios=Renrolador(j)*Fcc2(j);
Tatrito=0.001*Menrolador(j)*10*Renrolador(j);
dw=(Tbobinador(j)-Tfios-Tatrito)/Jm;
we_enrolador=we_enrolador+dw*T;
Vbobinador(j+1)=we_enrolador*Renrolador(j);
if Vbobinador(j+1)<0,
    Vbobinador(j+1)=0;
end
if Metragem enrolador(j+1)>CompFios
    Vbobinador(j+1)=0;
end

teste2(j)=Tatrito;
teste4(j)=Tfios;
teste6(j)=Jm;

%Controle de tracao

%Coeficiente que depende do grau de elasticidade
dos fios
K1=100000;
%Atualizacao da tracao medida pela Celula de
Carga CC1
Fcc1(j+1)=Fcc1(j) + K1*(Vtracionador(j+1)-
Vdesenrolador(j+1))*T;
%Determinacao da margem de histerese permitida
para a tracao medida pela celula de carga CC1
MaxFcc1(j)= 150;
MinFcc1(j)= 50;

%Controle para que a tracao medida nao seja
negativa, pois nao ha sentido logico nisso
if Fcc1(j+1)<0
    Fcc1(j+1)=0;
end
%Saturacao da celula de carga CC1
if Fcc1(j+1)>3*MaxFcc1(j)
    Fcc1(j+1)=3*MaxFcc1(j);
end

%Coeficiente proporcional ao erro de tracao para
CC1
KErroTracao=0.01;

%Determinacao do Erro de tracao (quanto esta
fora da margem de histerese)
%Acao de controle proporcional ao erro
%Acao de controle feito pelo freio
if Fcc1(j+1)>MaxFcc1(j)
    ErroTracao(j)=MaxFcc1(j)-Fcc1(j+1);
TFreio(j+1)=TFreio(j)+KErroTracao*ErroTracao(j)*T;
elseif Fcc1(j+1)<MinFcc1(j)
    ErroTracao(j)=MinFcc1(j)-Fcc1(j+1);
TFreio(j+1)=TFreio(j)+KErroTracao*ErroTracao(j)*T;
else
    TFreio(j+1)=TFreio(j);
end

end

%Condicoes de nao-negatividade
if TFreio(j+1)<0
    TFreio(j+1)=0;
end

%Mesmo para CC2
K2=10000000;
Fcc2(j+1)=Fcc2(j) + K2*(Vbobinador(j+1)-
Vtracionador(j+1))*T;
MaxFcc2(j)= 1000;
MinFcc2(j)= 100;

if Fcc2(j+1)<0
    Fcc2(j+1)=0;
end
if Fcc2(j+1)>3*MaxFcc2(j)
    Fcc2(j+1)=3*MaxFcc2(j);
end

KErroTracao=0.0001;
KErroTracaoInt=0;

if Fcc2(j+1)>MaxFcc2(j)
    ErroTracao(j)=MaxFcc2(j)-Fcc2(j+1);
ErroTracaoAcum(j+1)=ErroTracaoAcum(j)+ErroTracao(j);
Tbobinador(j+1)=Tbobinador(j)+(KErroTracao*ErroTraca
o(j)+KErroTracaoInt*ErroTracaoAcum(j+1))*T;
elseif Fcc2(j+1)<MinFcc2(j)
    ErroTracao(j)=MinFcc2(j)-Fcc2(j+1);
ErroTracaoAcum(j+1)=ErroTracaoAcum(j)+ErroTracao(j);
Tbobinador(j+1)=Tbobinador(j)+(KErroTracao*ErroTraca
o(j)+KErroTracaoInt*ErroTracaoAcum(j+1))*T;
else
    Tbobinador(j+1)=Tbobinador(j);
end

if Tbobinador(j+1)<0
    Tbobinador(j)=0;
end
j=j+1;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 12.0 - Plotagem dos resultados da simulacao
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(1)

subplot(2,2,1);
plot(t,Fcc1,t,MinFcc1,t,MaxFcc1);
title('Tracao no Tensiometro 1');
legend('Tracao CC1','Min','Max');
xlabel('tempo (s)');

subplot(2,2,2);
plot(t,Vbobinador,t,Vdesenrolador,t,Vtracionador);
title('Velocidades dos fios nos rolos');
legend('1','2','3');
xlabel('tempo (s)');

subplot(2,2,3);
plot(t,Fcc2,t,MinFcc2,t,MaxFcc2);
title('Tracao no Tensiometro 2');
legend('Tracao CC2','Min','Max');
xlabel('tempo (s)');

subplot(2,2,4);
plot(t,TFreio,t,Tbobinador);
title('Torque motor');
legend('Freio','Bobinador');
xlabel('tempo (s)');

pause
figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(t,Rdesenrolador,t,Renrolador);
title('Raios dos Cilindros')
ylabel('m')
xlabel('tempo (s)');
legend('Gaiola','Bobinador');
subplot(3,1,2)
plot(t,Mdesenrolador,t,Menrolador);
title('Massa dos Rolos')
legend('Gaiola','Bobinador');
xlabel('tempo (s)');
subplot(3,1,3)
plot(t,Metragemdesenrolador,t,Metragem enrolador);
legend('Metragem 1','Metragem 2');
xlabel('tempo (s)');

pause
figure(3)
subplot(3,1,1)
plot(t,teste1,t,teste2);

```

```

xlabel('tempo (s)');
legend('Atrito 1', 'Atrito 2');
subplot(3,1,2)
plot(t, teste3, t, teste4);
title('Tracao nos Fios')
legend('CC1', 'CC2');
ylabel('N')
xlabel('tempo (s)');
subplot(3,1,3)
plot(t, teste5, t, teste6);
legend('Jm 1', 'Jm 2');
xlabel('tempo (s)');
pause

close all

%Fim do Programa

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
%Centro de Engenharia Eletrica e Informatica - CEEI
%Programa de Trabalho de Conclusao de Curso
%Titulo do Programa: Controle de Nivel e Temperatura
de um Modelo de Engomadeira Industrial de Grande
Porte
%Nome do Programa: EngomadeiraTanque.m
%Autor: Wesley Catao Fadio Curi (20311215)
%Data: 11 de Agosto de 2008
%Descricao:
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 1.0 - Limpeza de Tela, Liberacao de Memoria e
Fechamento de Janelas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
close all;
clear all;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 2.0 - Definicao das variaveis de simulacao
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

j=1; %Variavel do numero
da amostra %Periodo de
T=2e-1; %Periodo de
amostragem %Tempo de simulacao
Tsim=20000; %Numero total de
J=Tsim/T; %Numero total de
amostras
t=linspace(0,Tsim,J); %Vetor tempo

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 3.0 - Definicao das variaveis do sistema
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

R=10; %Resistencia Eletrica
(Ohms)
i=zeros(1,J); %Corrente que atravessa
a resistencia (Ampere)
temp=zeros(1,J); %Temperatura da goma no
tanque (Kelvin)
tempMin=zeros(1,J); %Temperatura Minima da
goma no tanque (Kelvin)
tempMax=zeros(1,J); %Temperatura Maxima da
goma no tanque (Kelvin)
Vmedio=zeros(1,J); %Tensao Media aplicada a
resistencia (Volts)
PerdasCalor=2000; %Perdas de isolacao
(Watts)
Pot=zeros(1,J); %Potencia termica
absorvida pela goma (Watts)
Etemp=zeros(1,J); %Erro de Temperatura
SomaErro=0; %Acumulo do erro de
temperatura
Atraso=500; %Atraso referente ao
tempo de transferencia de potencia (segundos)

Nfios=700; %Numero de fios por rolo
m=zeros(1,J); %Massa de goma no tanque
(kg)
c=10e3; %Calor Especifico da
Goma (J/kg*K)
A=1; %Area da Seccao
Transversal do tanque(m2)
h=zeros(1,J); %Nivel do tanque (m)
hHisMax=zeros(1,J); %Nivel Maximo na faixa
de histerese
hHisMin=zeros(1,J); %Nivel Minimo na faixa
de histerese
pickup=zeros(1,J); %Massa de goma absorvida
por metro de fio (kg/m)
valv=zeros(1,J); %Valvula on/off
dens=1200; %Densidade da goma
(kg/m3)
v=zeros(1,J); %Velocidade media dos
fios (m/s)
Z=50e-6; %Vazao maxima pela
valvula on/off (m3/s)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 4.0 - Inicializacao de variaveis do sistema
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

hHisMax(1)=0.75;
hHisMin(1)=0.65;

h(1)=0.5*(hHisMax(1)+hHisMin(1));
m(1)=h(1)*A*dens;

temp(1)=95+273;
tempMin(1)=93+273;
tempMax(1)=97+273;

```

```

Vmedio(1)=220;

tempMin(J)=93+273;
tempMax(J)=97+273;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 5.0 - Loop Principal
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

while j<J

    hHisMax(j)=0.8;
    hHisMin(j)=0.6;

    %    v(j)=0.2;

    i(j)=Vmedio(j)/R;
    Pot(j)=R*i(j)^2;

    if j<J/4
        v(j+1)=v(j)+0.000001;
    elseif j>=J/4 && j<2*J/4
        v(j+1)=v(j);
    elseif j>=2*J/4 && j<3*J/4
        v(j+1)=v(j)-0.000001;
    else
        v(j+1)=v(j);
    end

    pickup(j)=1e-3*v(j+1);

    if j>Atraso/T
        temp(j+1)=temp(j)+(Pot(j)-Atraso/T -
PerdasCalor)/(c*m(j))*T;
    else
        temp(j+1)=temp(j);
    end

    if temp(j+1)<23+273,
        temp(j+1)=23+273;
    end

    m(j+1)=m(j) - Nfios*pickup(j)*v(j+1)*T +
    valv(j)*Z*dens*T;
    if m(j+1)<0,
        m(j+1)=0;
    end

    h(j+1)=m(j+1)/(dens*A);

    if h(j+1)<hHisMin(j)
        valv(j+1)=1.001;
    elseif h(j+1)>hHisMax(j)
        valv(j+1)=-0.001;
    else
        valv(j+1)=valv(j);
    end

    tempMin(j)=93+273;
    tempMax(j)=97+273;

    if temp(j+1)<tempMin(j)
        Etemp(j)=tempMin(j)-temp(j+1);
    elseif temp(j+1)>tempMax(j)
        Etemp(j)=tempMax(j)-temp(j+1);
    else
        Etemp(j)=0;
    end

    SomaErro=SomaErro+Etemp(j);

    Kp=0.1;
    Ki=1;

    Vmedio(j+1)=(Kp*Etemp(j) + Ki*SomaErro)*T;
    if Vmedio(j+1)>360
        Vmedio(j+1)=360;
    elseif Vmedio(j+1)<0
        Vmedio(j+1)=0;
    end

    j=j+1;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 6.0 - Plotagem dos Resultados
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(1);

subplot(2,1,1);
plot(t,v,'k-');
title('Velocidade dos fios');
ylabel('m/s')

subplot(2,1,2);
plot(t,pickup,'k-');
title('Pickup de goma');
ylabel('kg/m')

figure(2);

subplot(4,1,1);
plot(t,v,'k-');
title('Velocidade dos fios');
ylabel('m/s')

subplot(4,1,2);
plot(t,m,'k-');
title('Massa de goma em funcao do tempo');
ylabel('kg')

subplot(4,1,3);
plot(t,h,'k-',t,hHisMax,'k:',t,hHisMin,'k--');
legend('Nivel de Goma','Nivel Maximo','Nivel
Minimo')
ylabel('metros')

subplot(4,1,4);
plot(t,valv,'k-');
title('Valvula On/Off')
legend('1-(liga) 0-(desliga)')
xlabel('tempo (s)');

figure(3);

subplot(3,1,1);
plot(t,v,'k-');
title('Velocidade dos fios');
ylabel('m/s')

subplot(3,1,2);
plot(t,temp-273,'k-',t,tempMin-273,'k--',t,tempMax-
273,'k:');
ylabel('oC');
legend('Temperatura da Goma','Temperatura
Minima','Temperatura Maxima');

subplot(3,1,3);
plot(t,Vmedio,'k-');
title('Tensao Media Aplicada');
xlabel('tempo (s)');

%Fim do programa

```