

AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE “FILAMENT WINDING”

Sérgio Ricardo Milki de Sousa

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, C.P. 68503, CEP. 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: sergiomilki@uol.com.br

Armando Carlos de Pina Filho

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, C.P. 68503, CEP. 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: pina-filho@mecanica.coppe.ufrj.br

Max Suell Dutra

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, C.P. 68503, CEP. 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: max@mecanica.coppe.ufrj.br

Resumo. *O processo de "Filament Winding" consiste no enrolamento de feixes de fibras (impregnadas por resina) sobre um mandril (geralmente em forma cilíndrica) para construção de tubos, vasos de pressão, etc. A automação desse processo tem por objetivo a otimização do mesmo, sendo desenvolvida pelo conceito de Comando Numérico Computadorizado (CNC), que é um sistema que interpreta um conjunto de informações pré-definidas, codificadas em um formato simbólico, permitindo a máquina executar as instruções e, ainda, verificar os resultados para que a precisão seja mantida. No decorrer do trabalho serão apresentados vários diagramas do sistema, bem como rotinas realizadas pelo mesmo, procurando demonstrar a efetiva automação do processo.*

Palavras-chave: *automação, Filament Winding, processos de fabricação.*

1. INTRODUÇÃO

O processo de “Filament Winding” é descrito como uma técnica que é constituída basicamente por dois componentes: uma fita ou filamento reforçado e uma matriz ou resina. O processo consiste no enrolamento de feixes de fibras (impregnadas por resina) sobre um mandril (geralmente em forma cilíndrica) para construção de tubos, vasos de pressão, etc. Nesta técnica pode-se controlar o ângulo de enrolamento, a tração nas fibras, o banho de resina, e a espessura da parede da peça. Após o enrolamento, a peça passa por um processo de cura, através de um forno rotativo, por ultravioleta, etc., para depois ser retirada do mandril e estar pronta para a finalidade a qual foi produzida.

Por décadas, os projetos de máquinas de “Filament Winding” foram se aperfeiçoando com os avanços tecnológicos. As primeiras máquinas, surgidas em 1947, possuíam baixo agregado tecnológico: com apenas dois eixos (um de translação e um de rotação), uma viga sustentada por colunas e suportes para os rolos. Mesmo com essa simplicidade, foram criadas as primeiras peças, fabricadas por esse processo, para a indústria aeronáutica.

Com o passar dos anos, mais especificamente nos anos 80/90, houve um grande avanço no equipamento com a adição de um terceiro eixo (radial), além de mudanças na estrutura da máquina e caixas de engrenagens para suavizar e introduzir exatidão ao processo. Mais tarde apareceram os computadores, para permitir processamento dos dados, resultando em movimentos mais suaves e colocação das fibras com maior acuidade. Os computadores e conseqüente automação dos processos tornaram-se essenciais para o avanço tecnológico das máquinas.

A Figura 1 apresenta um esquema do processo de “Filament Winding”.

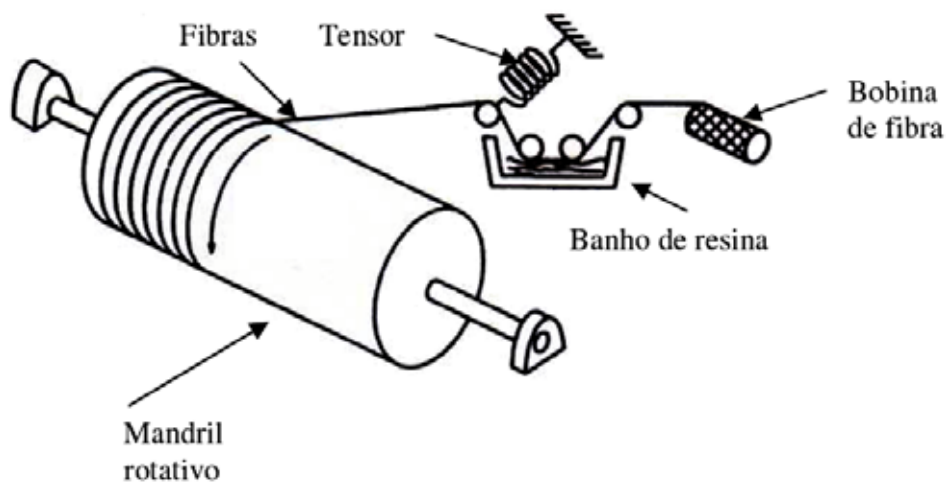


Figura 1. Processo de "Filament Winding" (Gibson⁽¹⁾).

Alguns trabalhos interessantes sobre o processo de "Filament Winding" são apresentados por Mascheroni⁽²⁾, Ellyin et al.⁽³⁾, e Carrino et al.⁽⁴⁾.

O objetivo deste trabalho é mostrar a automação do processo de "Filament Winding", sendo esta desenvolvida pelo conceito de Comando Numérico Computadorizado (CNC), que é um sistema que interpreta um conjunto de informações pré-definidas, codificadas em um formato simbólico, permitindo a máquina executar as instruções e, ainda, verificar os resultados para que a precisão seja mantida. Com esta automação pretende-se alcançar uma otimização do processo de fabricação.

2. COMPONENTES DE UM SISTEMA CNC

Um sistema CNC possui diversos componentes, tais como: o programa principal, o programa de controle, o programa-peça, o hardware do sistema. A Figura 2 apresenta um diagrama dos componentes de um sistema CNC para um eixo. Este conceito pode ser estendido para vários eixos.

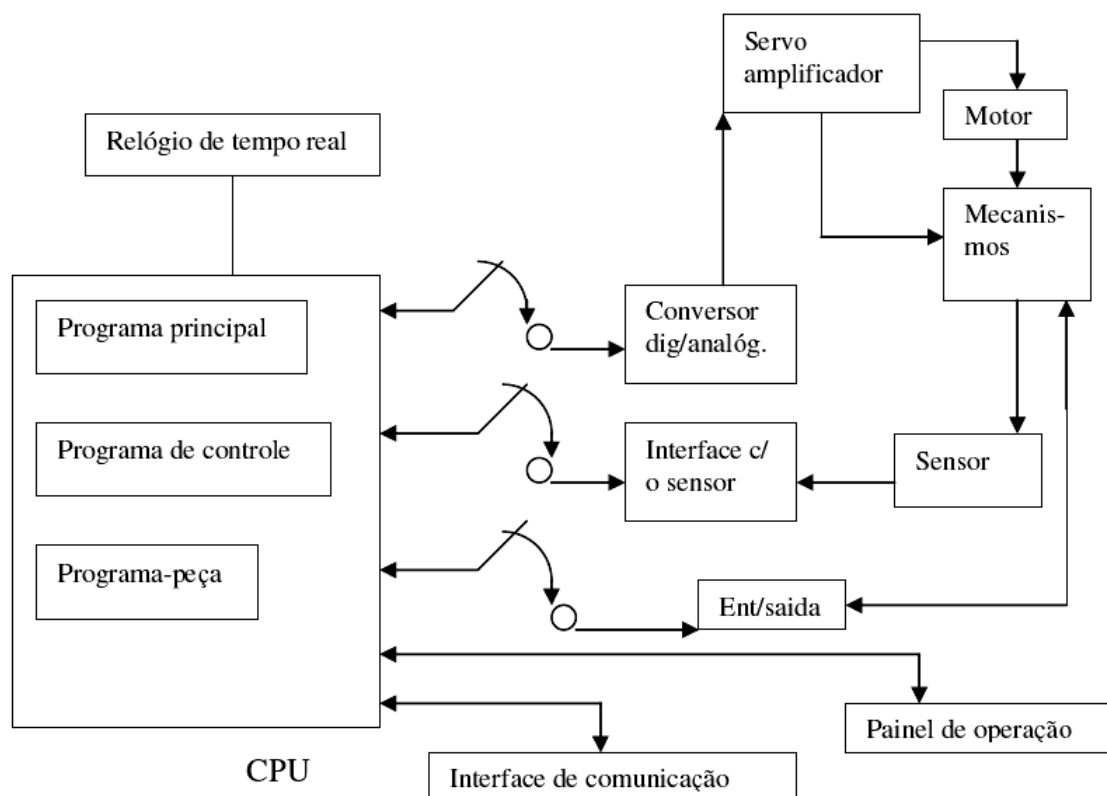


Figura 2. Sistema CNC para um eixo.

O programa principal é responsável por executar um programa NC, e faz a interface com o operador (visualiza as variáveis de processo, edição e correção do programa-peça, etc.) permitindo a programação e configuração da máquina pelo operador.

O programa de controle é responsável pela sinalização de comandos para os acionamentos através dos dados fornecidos pelo programa-peça, realizando funções de interpolação/controle, por eixo, em malha fechada; gera rampas de aceleração e desaceleração; comando/controle de variáveis, tais como: fim de curso, chaves de emergência, sinalizadores, etc.

O programa-peça é responsável pelas informações geométricas/tecnológicas, tais como: trajetórias, velocidades de avanço, velocidades de rotação, sincronização de velocidades, etc.

O hardware do sistema CNC é formado por: CPU (que processa os dados); relógio de tempo real (que fixa a frequência de amostragem e processamento dos dados); interface com sensores (que processam a informação para posterior leitura pela CPU); conversor analógico/digital (que interliga o CNC com os acionamentos), e um dispositivo de E/S (entrada/saída), com função CLP (controlador lógico programável), que monitora/comanda as variáveis digitais.

3. SUBDIVISÃO DO HARDWARE

Na Figura 3 é mostrado o esquema detalhado do hardware para máquina de “Filament Winding”.

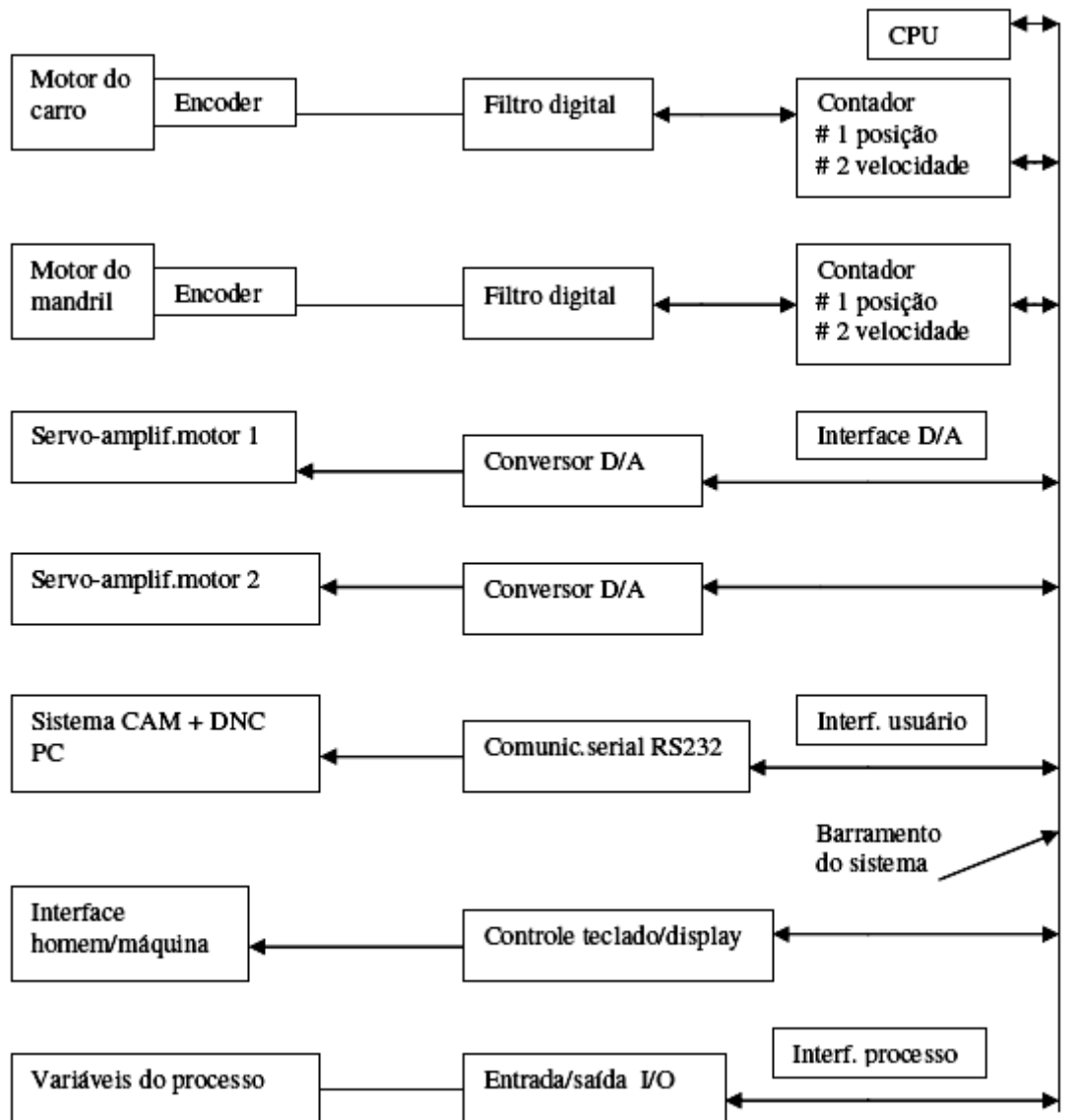


Figura 3. Esquema detalhado do hardware.

Pode-se observar a presença de servo-amplificadores e motores dos eixos do mandril e do carro, e o computador PC, que serve como base para o software gerenciador, e para apoiar o sistema DNC (controle numérico distribuído), o qual realiza e controla as tarefas de comunicação com a máquina. Tem-se uma placa em padrão eurocard interligando aos módulos pela placa de barramento.

A placa de CPU, também chamada de módulo de processamento e memória, é baseada no microprocessador da INTEL de 6 MHz ou 10 MHz. O módulo de comunicação e interface com usuário é feito pelos seguintes dispositivos: comunicação serial RS232, controlador de teclado/display, e interface paralela “Centronics”, a qual permite a transferência de dados em conjunto de oito bits.

Em relação ao módulo de entrada e saída de sinais digitais, é utilizada a placa interface processo II, para comandar/monitorar variáveis digitais do processo, função CLP (possibilitando a iteração da máquina com outros dispositivos), tais como: sensores, teclas, chaves de fim de curso, lâmpada, etc.

A interface encoder filtra sinais do codificador angular (transdutor) instalados no motor, fornecendo suporte de hardware para processamento dos valores de posição e velocidade realizados pela CPU, e implementando o relógio de tempo real para controle do sistema, com uma placa para cada motor.

A interface digital/analógico converte o valor processado pela CPU em um sinal analógico para acionamento das velocidades do sistema. A placa possui uma interface paralela programável, e realiza a interface de dois conversores digitais/analógicos com o resto do sistema.

Os contadores dão suporte de hardware para o cálculo de velocidade e posição, e são implementados com um timer programável, que apresenta três contadores decrescentes, independentes de 16 bits, com frequência máxima de 2 MHz. O cálculo da frequência de amostragem “F” é dado pela equação:

$$F \geq 2.(\omega_0/2\pi) = \omega_0/\pi = 1/T \quad (1)$$

A condição necessária para seleção do período de amostragem é: $T/\tau < \pi$; o acionamento de um sistema CNC tem comportamento com frequência $\omega_0 = 1/\tau$, onde τ é a constante de tempo do sistema.

4. SISTEMA OPERACIONAL DO CNC

O sistema operacional do CNC é aquele que gerencia as atividades que o computador realiza. Dois tipos de rotinas devem ser consideradas: rotinas de tempo real e rotinas de máquina. O início da execução de rotinas de tempo real está relacionado ao relógio de tempo real, enquanto as rotinas de máquina à interferência do operador.

As rotinas de tempo real são disparadas por uma interrupção do hardware, numa frequência “F” comandada pelo relógio de tempo real (veja Figura 4).

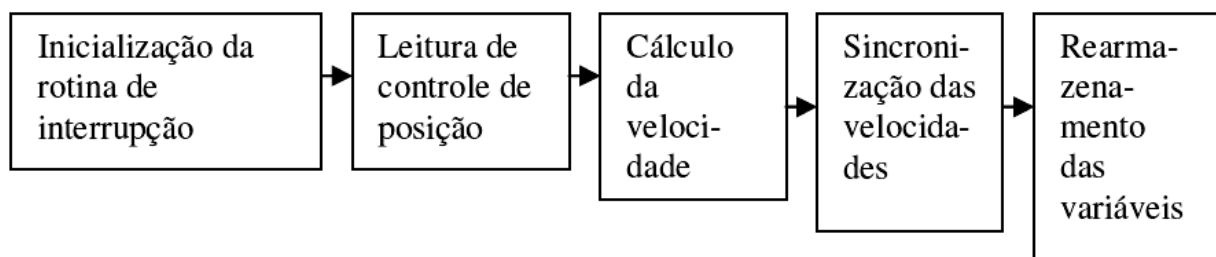


Figura 4. Rotinas de tempo real.

As rotinas de máquina são: inicialização das variáveis; gerenciamento do teclado/display; controle e comando de variáveis, tais como: chave de fim de curso, botoeiras, emergência, etc.; gerenciamento e execução do DNC; e programação e busca do zero da peça e zero da máquina (veja Figura 5).

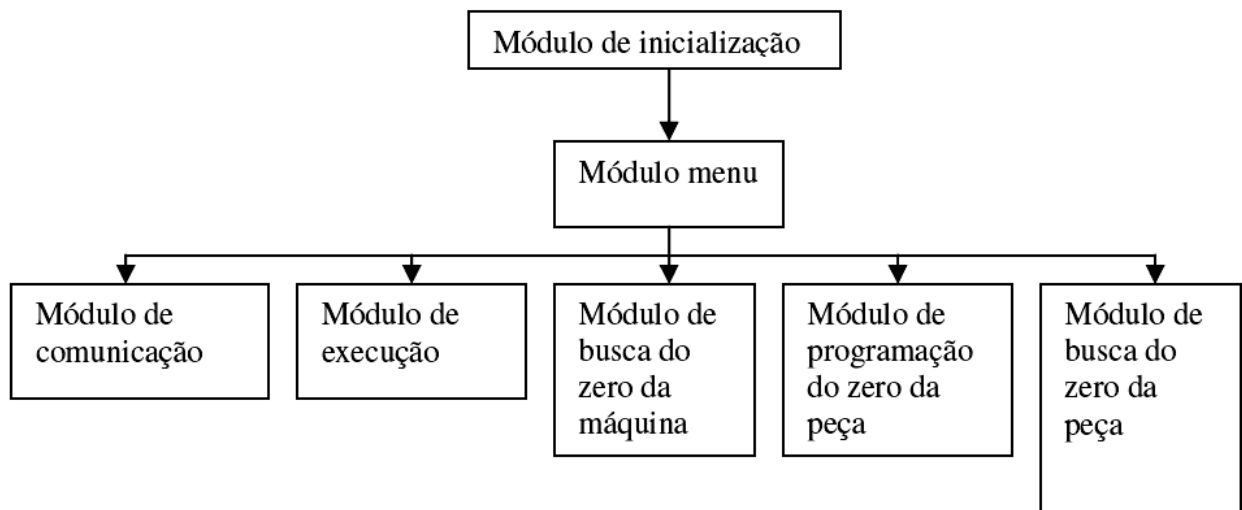


Figura 5. Rotinas de máquina.

4.1. Rotinas de Tempo Real

A primeira rotina de tempo real se refere à medição e controle de posição. Diversos dispositivos podem ser usados para medição de posição. Um dos métodos de medição de posição angular mais utilizado é o encoder. O encoder é um transdutor utilizado para converter posições lineares e de rotação em dados digitais. O hardware para contar os pulsos gerados pelo encoder, que incrementa o registro em uma unidade a cada pulso recebido na sua entrada, é o “Timer programado 8354”.

A melhor maneira de realizar essa contagem é a chamada “rollover”, que é um dispositivo contador que quando atinge o valor máximo ($E_R \geq X_{\max}$), recomeça do zero. Assim elimina a idéia de que o fator tamanho do contador é um limitante, mas as operações do software são feitas em tempo real. A Figura 6 apresenta o fluxograma do sistema.

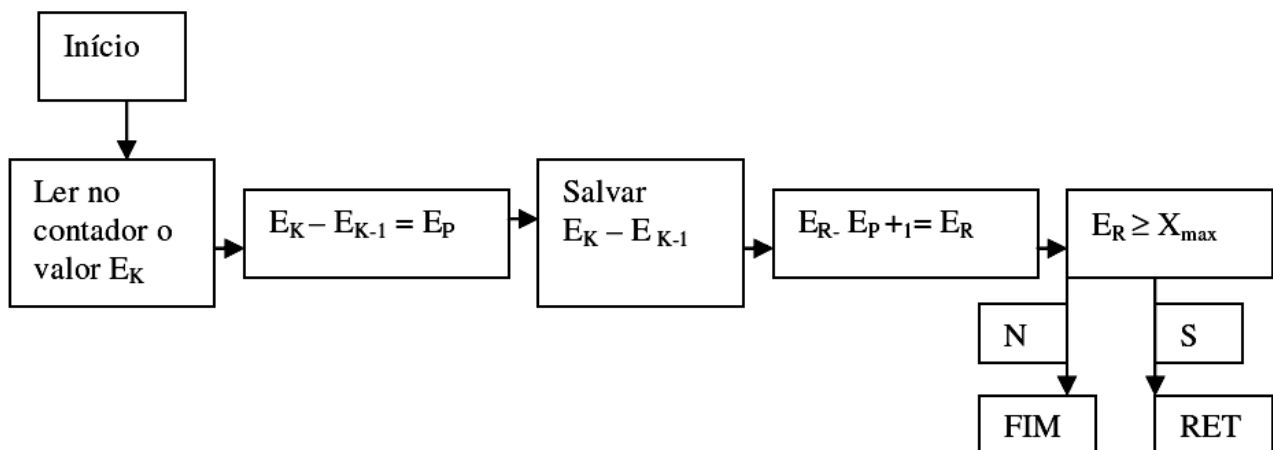


Figura 6. Sistema de medição e controle de posição.

Na figura, $(E_K - E_{K-1})$ é o valor lido em software do contador subtraído da leitura anterior; E_P é o valor proporcional ao incremento da posição da leitura anterior; E_R é o valor acumulado; e X_{\max} é o valor máximo de posição.

A próxima rotina de tempo real se refere à medida de velocidade. Equipamentos que envolvem sistemas rotativos exigem constantemente o controle de velocidade. Os parâmetros a serem considerados são: resolução, precisão, tempo de detecção, e faixa de medição. O método utilizado para medição de velocidade é o algoritmo de estimação de período e frequência. Com esse método obtêm-se os melhores resultados, tanto em altas como em baixas velocidades.

Esse algoritmo de estimação é dado pela seguinte equação:

$$V_m = 60 \cdot \text{número de pulsos} / T_{\text{med}} \cdot P \quad (2)$$

onde: T_{med} é o tempo que o sistema precisa para realizar a medição, e P é o desvio máximo sofrido pelo valor medido em relação ao real.

Em relação à sincronização de velocidades, no esquema da Figura 7 tem-se a relação de variação fixa em dados de saída; para cada eixo existe um acionamento controlado eletronicamente. Essa programação é realizada por um software para sistemas microprocessados. Tem-se um motor e um acionamento por eixo, sendo um dos eixos “mestre”, cujo valor servirá de referência para os outros. A velocidade do eixo “escravo” é proporcional (com razão de proporção programável K D/A), à velocidade do eixo “mestre” (veja Figura 8).

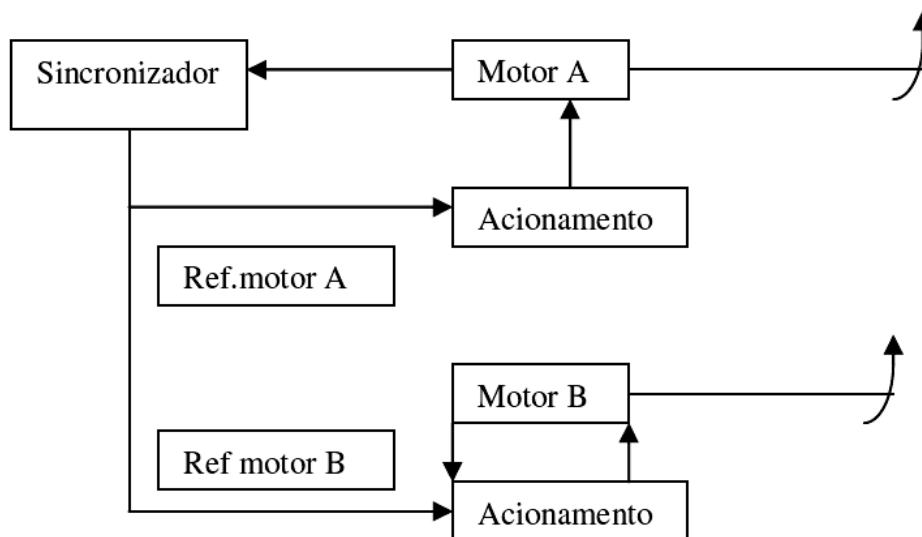


Figura 7. Esquema de sincronização das velocidades.

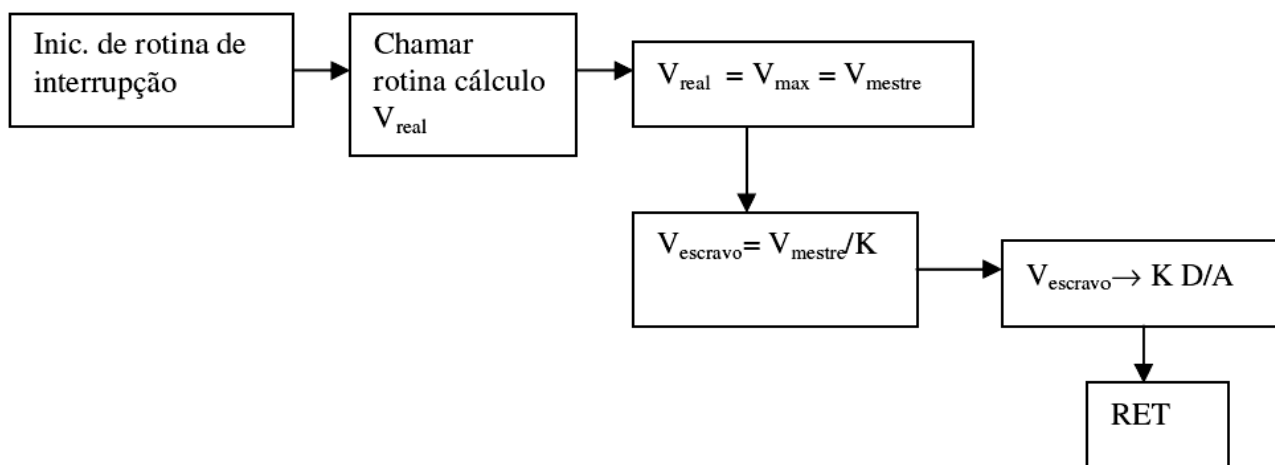


Figura 8. Proporcionalidade entre eixo “mestre” e eixo “escravo”.

4.2. Rotinas de Máquina

A primeira rotina de máquina se refere ao módulo de inicialização, que programa as variáveis da máquina que precisam ser inicializadas ao ligar o sistema e realizar os auto-testes, como: teste do “checksum” da ROM (que soma byte a byte o código do sistema operacional do CNC sem levar em conta o transbordamento), teste da memória usuário (RAM), e teste de periféricos. O transbordamento é parte de um item de dados que não pode ser armazenado porque os dados excedem a capacidade da estrutura disponível.

O módulo menu está encarregado de gerenciar a operação do teclado do painel principal/remoto. A ativação de uma tecla pode executar uma rotina ou erro. Está relacionado a funções de definição

do zero-peça, busca do zero-peça e busca do zero-máquina, além da transmissão e recepção do programa peça, execução de programa e execução passo-a-passo.

O módulo de busca zero-máquina posiciona a máquina num ponto de referência absoluto, implementando também o teclado da máquina em casos de emergência. Para conseguir o objetivo, o procedimento é o seguinte: verificar se alguma chave de fim de curso está pressionada; caso não esteja, deve-se movimentar o eixo "X" (deslocamento do carro) para procurar a chave do lado zero da máquina. Caso esteja pressionada, a máquina se movimenta no outro sentido proporcional a um número inteiro de pulsos de encoder, assim se obtêm o ponto de referência absoluto.

O zero-peça é o ponto inicial onde se inicia o enrolamento da peça, que é um valor de referência ao zero-máquina. O valor da coordenada é introduzido deslocando a máquina manualmente até a posição desejada. Esse valor é lido e gravado na memória e associado com o programa da peça a ser enrolada.

O módulo de execução executa o programa peça e atualiza no display da máquina o número de camadas à medida que são colocadas no mandril. Blocos de dados são carregados em tempo real, e depois o programa fica monitorando as variáveis. A Figura 9 apresenta um fluxograma do módulo de execução.

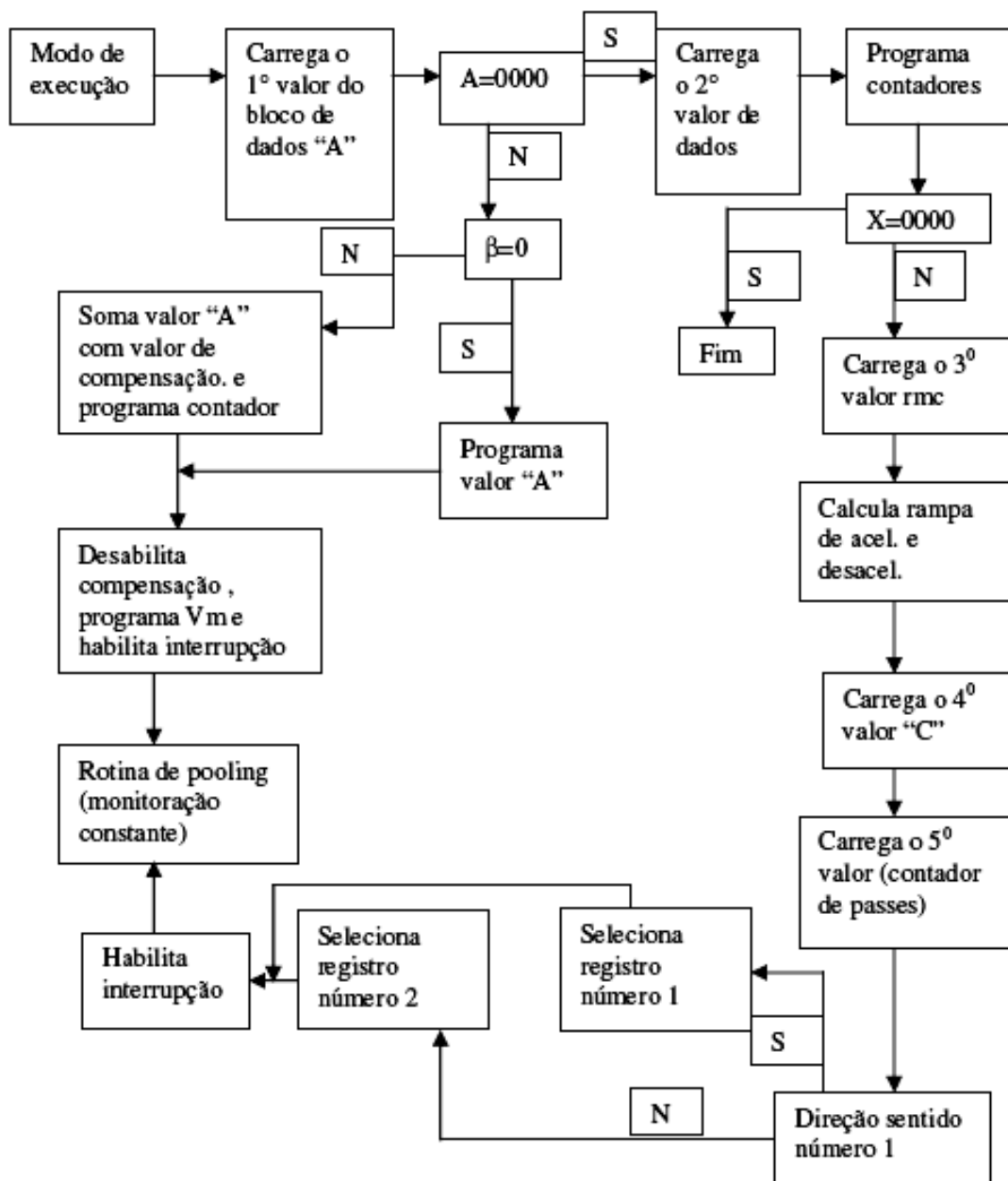


Figura 9. Fluxograma do módulo de execução.

5. DIAGRAMA DE CONTROLE

Uma forma conveniente de representar equações matemáticas que governam sistemas físicos é por meio de um diagrama de blocos, similar aos utilizados no passado para simulação de computadores analógicos. Diagramas de blocos consistem da interconexão de vários blocos elementares com a função de cada bloco representada de forma esquemática por meio de um símbolo dentro do bloco. Os elementos mais comumente utilizados são: os integradores, amplificadores, somadores e geradores de funções.

O controle da máquina de “Filament Winding” é classificado como um sistema de controle em tempo real, onde o sinal de realimentação ocorre em intervalos fixos (tempo de amostragem), e é colocado na saída via conversor digital/analógico. Comparando com o sinal alimentado continuamente, o sinal alimentado ao acionamento da máquina não é contínuo, e sim digital.

Logo, a partir de dados fornecidos por Silva⁽⁵⁾, foi gerado o diagrama mostrado na Figura 10.

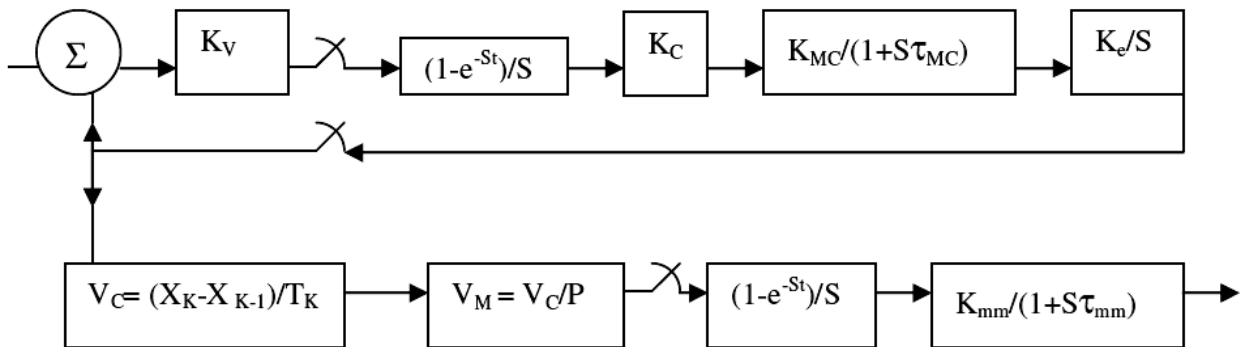


Figura 10. Diagrama de controle.

Na figura, Σ representa o bloco somador; K_V é o ganho da malha de posição (V/pulsos); $(1-e^{-St})/S$ é o chamado “sustentador” de ordem zero ($t =$ tempo de amostragem); K_C é o ganho do servo-amplificador; $K_{MC}/(1+S\tau_{MC})$ representa a função de transferência do motor + carga, onde: τ_{MC} é a constante de tempo do sistema mecânico do carro, e K_{MC} é o ganho do motor (rad/s)/V; K_e/S é o codificador angular + contador, onde: K_e é o ganho do codificador em (pulsos/rad); V_C é o estimador de velocidade, onde: X_{K-1} é a posição inicial, X_K é a posição final, e T_K é o tempo relativo a posição); V_M é a sincronização de velocidades ($P =$ coeficiente de sincronização); e $K_{mm}/(1+S\tau_{mm})$ representa a função de transferência do motor + carga, onde: τ_{mm} é a constante de tempo do sistema mecânico do mandril, e K_{mm} é o ganho do motor (rad/s)/V.

Para analisar a estabilidade do sistema de controle será utilizado o critério de Routh (Ogatha⁽⁶⁾), pois este critério diz se existe ou não raízes positivas de uma equação sem ter que resolvê-las. O ganho do sistema será $K_V K_C K_{MC} K_e$ (K). Utilizando a função de transferência em malha fechada:

$$\frac{C_{(s)}}{R_{(s)}} = \frac{K}{S(1+S\tau_{mm})+K} \quad (3)$$

A equação característica é:

$$S(1+S\tau_{mm})+K=0 \quad (4)$$

Logo:

$$\tau_{mm}S^2+S^1+K=0 \quad (5)$$

Considerando $a_0 = \tau_{mm}$; $a_1 = 1$; $a_2 = K$; $a_3 = 0$; $b_1 = K$; e $b_2 = 0$, a tabela de coeficientes torna-se:

$$\begin{bmatrix} S^2 & \tau_{mm} & K & 0 \\ S^1 & 1 & 0 & 0 \\ S^0 & K & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Quando um coeficiente for inexistente pode ser substituído por um 0(zero) na tabela. Para estabilidade, K deve ser positivo, e todos os coeficientes da primeira coluna devem ser positivos. Assim $K > 0$ e τ_{mm} (constante de tempo) > 0 .

6. OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA

Para otimização dinâmica do sistema existem alguns critérios, tais como: critério da integral do erro quadrático, critério da integral do erro quadrático multiplicado pelo tempo, critério da integral do erro absoluto, etc.

O critério mais adequado para o projeto ótimo de servo-mecanismo de controle de posição é o critério da integral do erro absoluto. Segundo Koren e Bollinger⁽⁷⁾, o valor de K que minimiza a equação:

$$I = -E(0) + 2[E(t_1) - E(t_2) + E(t_3)] \quad (7)$$

é

$$K = 1/\tau [0,5664 - 0,2966(T/\tau) + 0,1135(T/\tau)^2 + 0,0197(T/\tau)^3] \quad (8)$$

Dessa forma os erros cometidos serão menores que 0,04%.

Considerando que a constante de tempo $\tau > 0$, o valor de K fornecido pela equação deve ser sempre maior do que zero, para $T/\tau < \pi$. Logo, adotando por exemplo: $\tau = 1$ e $T/\tau = \pi/2$, substituindo os valores em (8), tem-se: $K = 0,4569$. Esse seria o valor adequado para otimização do sistema.

7. CONCLUSÃO

O trabalho aqui apresentado procurou demonstrar a automação do processo de “Filament Winding” utilizando um sistema de Comando Numérico Computadorizado (CNC). Tal automação é fundamental para otimização do processo de fabricação e conseqüente minimização dos erros na produção. A aplicação do critério da integral do erro absoluto, com o objetivo de otimização dinâmica do sistema, torna possível a determinação de um valor ótimo de K, fazendo com que os erros cometidos sejam menores que 0,04%. Esse processo de “Filament Winding” automatizado tem grande aplicação na fabricação de tubos, risers e vasos de pressão, podendo ser empregado na indústria petrolífera, naval, aeronáutica, automobilística, aeroespacial, etc.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro fornecido no decorrer deste presente trabalho.

9. REFERÊNCIAS

1. GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**. McGraw Hill, 1994.
2. MASCHERONI, J. M. **Automação de um processo de Filament Winding**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 1992.

3. ELLYIN, F.; WOLODKO, J.; DORLING, D.; GLOVER A.; JACK, T. Fiber Reinforced Composites in Pipelines Applications: Designs Issues and Current Research. In: **3rd International Pipeline Conference**. American Society of Mechanical Engineering, 2000.
4. CARRINO, L.; POLINI, W.; SORRENTINO, L. Modular structure of a new feed-deposition head for a robotized filament winding cell. **Composites Science and technology**, v. 63, n. 15, p. 2255-2263, nov. 2003.
5. SILVA, A. S. **Modelagem e Resposta de Sistemas Discretos**. Departamento de Engenharia Elétrica, Labspot, UFSC, 2004.
6. OGATHA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 2a ed. Brasil, Editora Prentice-Hall, 1993.
7. KOREN, Y.; BOLLINGER, J. G. Design Parameters for Sampled-Data Drivers for CNC Machines Tools. **IEEE Transaction on Industry Application**, v. 14, p. 255, 1978.

AUTOMATION OF THE PROCESS OF “FILAMENT WINDING”

Sérgio Ricardo Milki de Sousa

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Technology Center, P.O.Box 68503, Zip Code 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: sergiomilki@uol.com.br

Armando Carlos de Pina Filho

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Technology Center, P.O.Box 68503, Zip Code 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: pina-filho@mecanica.coppe.ufrj.br

Max Suell Dutra

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Technology Center, P.O.Box 68503, Zip Code 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: max@mecanica.coppe.ufrj.br

***Abstract.** The process of “Filament Winding” consists in the winding of bundles of fibers (impregnated with resin) on a drift (generally in cylindrical form) for construction of pipes, vases of pressure, etc. Automation of this process has for objective the optimization of same one, being developed by the concept of Computer Numeric Control (CNC), that is a system that interprets a set of pre-defined information, codified in a symbolic format, allowing the machine to perform the instructions and, still, to verify the results so that the precision is kept. In the course of the work some diagrams of the system will be presented, as well as routines performed by same one, looking for to demonstrate the effective automation of the process.*

***Keywords:** automation, Filament Winding, manufacture process.*