

# DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DO NÍVEL DO MOLDE PARA UM SISTEMA PILOTO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO<sup>(1)</sup>

Carmela Maria Polito Braga<sup>(2)</sup>  
Carlos Eduardo Barral<sup>(3)</sup>  
Fábio Gonçalves Jota<sup>(2)</sup>  
Leonardo Antônio da Silva<sup>(4)</sup>  
Thiago Oliveira Rezende<sup>(4)</sup>  
Roberto Parreiras Tavares<sup>(5)</sup>

## RESUMO

Modelos físicos têm sido utilizados para validar modelos matemáticos e otimizar sistemas industriais. No caso do lingotamento contínuo, o uso de modelos físicos permite levantar curvas DTR, analisar o efeito de modificadores de fluxo sobre o desempenho de distribuidores, assim como estudar a transição entre diferentes tipos de aços. Neste caso, torna-se essencial realizar experimentos operando simultaneamente os modelos do distribuidor e do molde. Para tal, é necessário o controle de vazões e níveis de fluido nesses dois reatores.

Neste trabalho, o controle digital do nível do molde a partir da válvula gaveta localizada na saída do distribuidor foi desenvolvido com o objetivo de tornar o comportamento do sistema piloto de lingotamento contínuo o mais próximo possível do de um sistema real e de se implementar um controle automático essencial para a integração completa do sistema (panela, distribuidor e molde).

A válvula gaveta usada no controle apresenta particularidades como histerese acentuada e tempo morto elevado, transformando-na em um complicado e interessante problema de controle.

O controle implementado é do tipo em cascata com dois controladores projetados a partir do método da síntese direta: o interno para a malha de vazão e o externo para a malha de nível.

Palavras chaves: lingotamento contínuo, molde, controle de nível.

---

(1) Contribuição Técnica a ser apresentada no VIII Seminário de Automação de Processos– ABM, Outubro/2004–Belo Horizonte/MG

(2) Professor do Departamento de Engenharia Eletrônica da UFMG;

(3) Mestrando em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG;

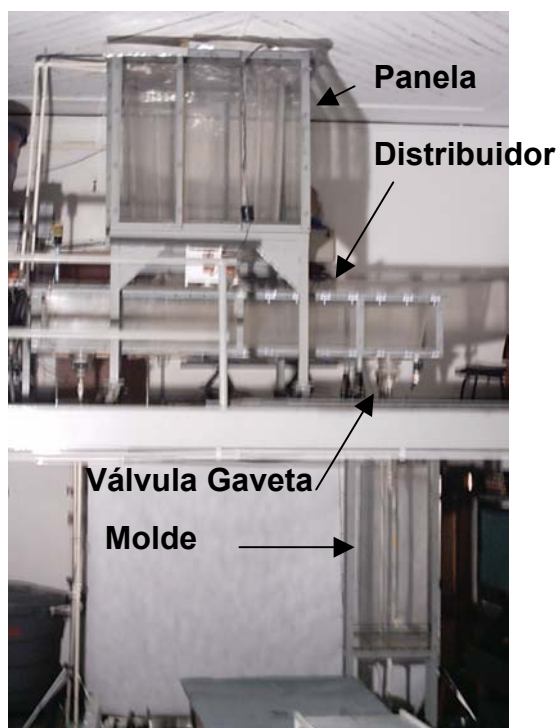
(4) Aluno de graduação em Engenharia de Controle e Automação da UFMG.

(5) Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG.

## 1 - INTRODUÇÃO

Atualmente o lingotamento contínuo é a forma mais usual de se processar o aço líquido. Neste processamento o aço passa por três reatores. A panela, onde são feitos os ajustes térmico e químico do banho, o distribuidor, que é um reator intermediário que serve de passagem para o aço líquido até o molde, sendo responsável pela continuidade do processo e o molde, onde o aço finalmente é solidificado.

O escoamento do aço líquido nestes três reatores pode ser simulado utilizando água como fluido no modelo físico da planta piloto de lingotamento contínuo existente no Laboratório de Simulação de Processos (LaSiP) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), que consiste de uma panela, um distribuidor com dois veios e um molde, todos em escala reduzida de 1:3 em relação a uma instalação industrial de uma usina siderúrgica de Minas Gerais (figura 1).



**Figura 1 – Modelos físicos de uma instalação de lingotamento contínuo**

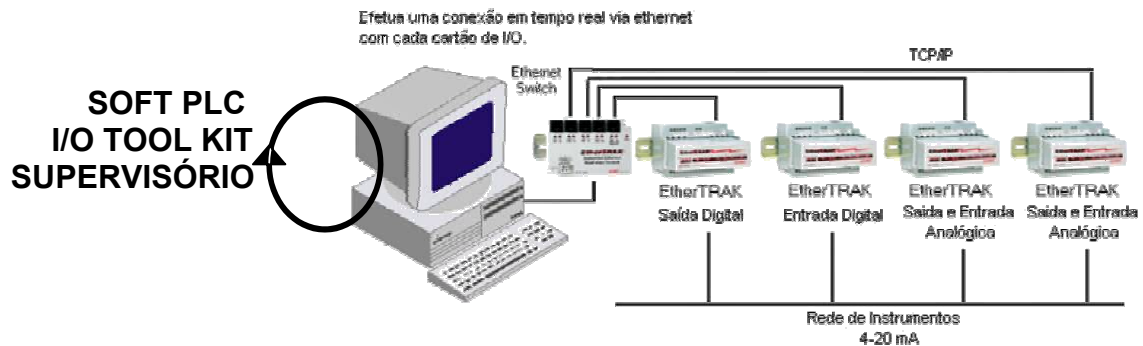
Este trabalho tem como foco principal o controle do nível do molde, uma vez que ele é essencial para a qualidade da placa lingotada. Oscilações desse nível podem causar o aumento do grau de inclusões no aço devido ao arrasto do pó fluxante; marcas de oscilação; trincas causadas pela má lubrificação do molde e aumento do risco de “break out” devido a uma solidificação insuficiente da “pele”.

Para a implementação do controle do nível do molde é de fundamental importância que haja uma total integração da planta. Essa integração é realizada pelo sistema de automação que consiste de sensores, atuadores, cartões de entrada e saída analógicos e digitais que se comunicam com um software que emula o funcionamento do controlador lógico programável (SoftPLC) via rede Ethernet 10/100Mbps (figura 2).

Esse sistema permite a implementação de toda lógica operacional no SoftPLC, a aquisição, disposição e gravação online dos valores das diversas variáveis de processo, a atuação em bombas e válvulas, etc.

A instrumentação diretamente associada ao molde consiste de um sensor de nível ultra-sônico com resolução de três milímetros, visto na figura 3.

Nessa figura, ressalta-se a presença da válvula submersa, que é o elemento de ligação do distribuidor com o molde.



**Figura 2 – Arquitetura do sistema de automação**



**Figura 3 - Molde com sensor de nível e válvula submersa**

A estratégia de controle avançada desenvolvida para manter o nível do molde definido pelo operador constante é denominada controle em cascata. Todo o controle é feito atuando-se na válvula gaveta localizada na saída do distribuidor, assim como é feito na aciaria.

## **2 – METODOLOGIA**

A seguir são discutidas as etapas de desenvolvimento do trabalho.

### **2.1 – COMPORTAMENTO DA VÁLVULA GAVETA**

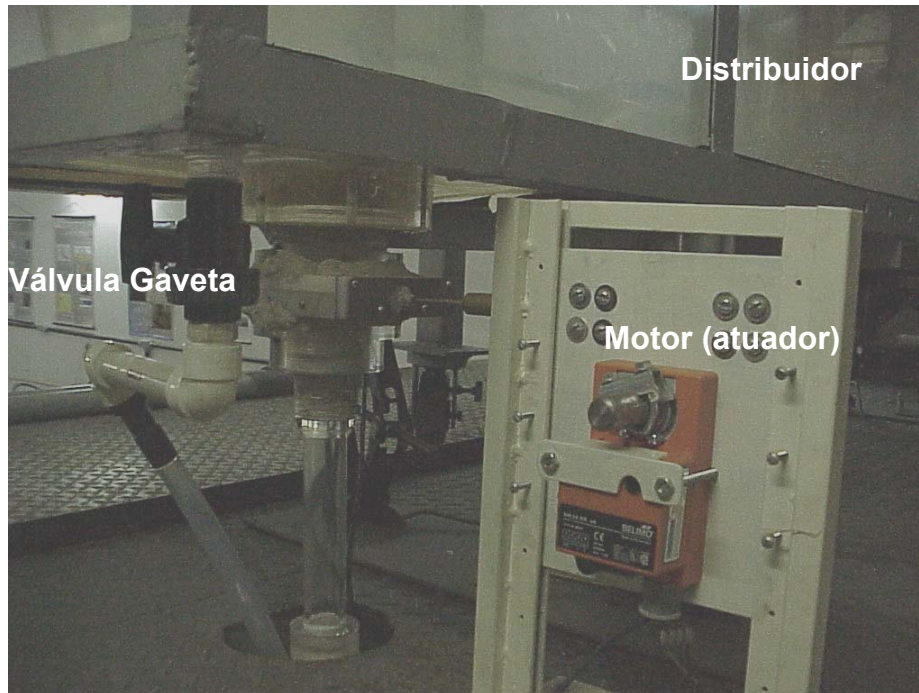
A válvula gaveta existente na saída de um dos veios do distribuidor é totalmente feita em acrílico e acionada por um sistema de pinhão e cremalheira acoplado a um atuador (figura 4).

Esse motor desempenha o papel do atuador da válvula gaveta. O seu deslocamento angular é diretamente proporcional ao sinal proveniente do PLC (4 a

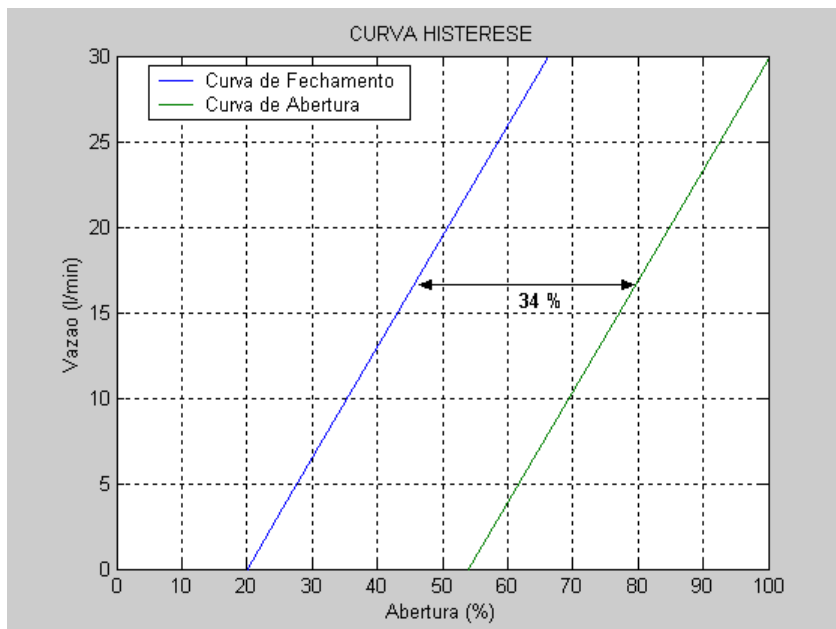
20 mA). O sistema pinhão e cremalheira transforma esse deslocamento angular em um deslocamento linear ainda sim proporcional ao sinal de 4 a 20 mA.

Portanto, o deslocamento da válvula gaveta é linear quando ela está abrindo ou fechando, porém, a curva de abertura e de fechamento estão deslocadas uma em relação à outra, o que caracteriza a histerese da válvula [1].

A diferença entre o comportamento de deslocamento da válvula quando ela está abrindo e fechando é de 34%, como pode ser observado na figura 5.



**Figura 4 – Motor, válvula gaveta, distribuidor e válvula submersa**



**Figura 5 – Histerese da válvula**

As prováveis razões para esse comportamento são: existência de folgas entre o pinhão e a cremalheira, pequeno curso de atuação do motor e diversos elementos

de resistência ao movimento da gaveta, tais como borracha de vedação e massa de calafetar.

São conseqüências da existência dessa histerese acentuada:

1. tempo morto considerável;
2. necessidade de se implementar um “compensador de histerese” na saída do controlador para que ele “enxergue” uma válvula linear.

Para levantar as características dinâmicas da válvula gaveta, adotou-se a metodologia discutida a seguir.

Mantendo a vazão de saída do molde constante (“velocidade de lingotamento constante”), variou-se a porcentagem de abertura da válvula para diversas amplitudes (isto é, aplicou-se degraus de abertura de diferentes amplitudes). Esses degraus obviamente causam a variação do nível do molde. Essa variação dá a informação sobre a vazão líquida (equação 1).

$$Q_{liquida} = \frac{\partial h}{\partial t} \cdot A \quad (1)$$

onde  $A$  é a área da seção transversal do molde e  $h$  é o nível de fluido (água) do molde.

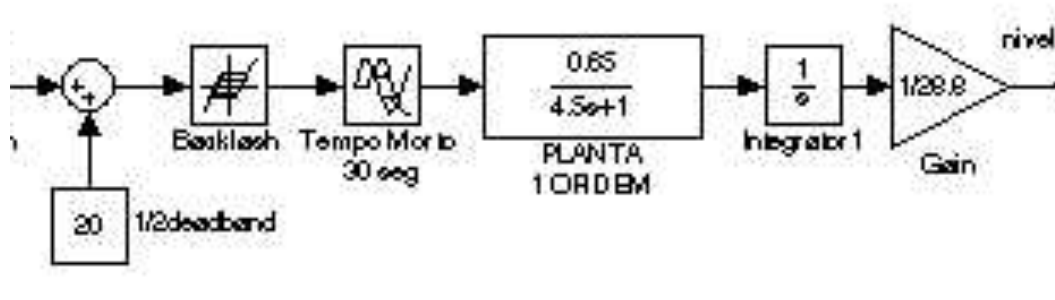
A partir dessas duas informações, obteve-se o modelo dinâmico que relaciona abertura e vazão líquida.

O modelo de primeira ordem mais tempo morto pode ser descrito pela função de transferência (equação 2):

$$G(s) = \frac{Vazão\ Líquida \left( \frac{m^3}{s} \right)}{Abertura(\%)} = e^{-\theta \cdot s} \cdot \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \quad \left\{ \begin{array}{l} K = \text{ganho em estado estacionário} = 0.65; \\ \theta = \text{tempo morto} = 30 \text{ segundos} \\ \tau = \text{constante de tempo} = 4.5 \text{ segundos} \end{array} \right. \quad (2)$$

Verifica-se que o tempo morto ( $\theta$ ) da planta, quando há mudança do sentido de deslocamento da válvula, é aproximadamente sete vezes maior que sua constante de tempo ( $\tau$ ). Isso torna essa válvula um complicado problema de controle, pois a relação  $\theta / \tau$  é maior que 0.5 [2].

Dessa maneira, a planta pode ser vista como a composição em série da histerese, do tempo morto e da planta  $G(s)$  (figura 6).



**Figura 6 – Diagrama de blocos da planta**

A compensação de histerese foi implementada usando o procedimento apresentado abaixo.

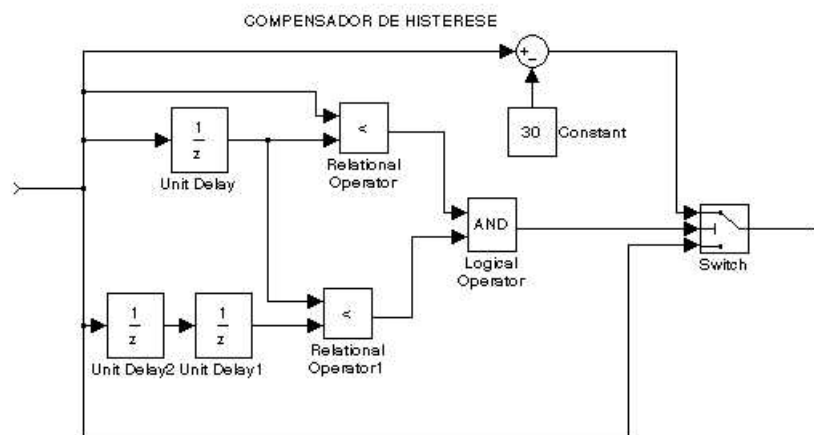
## 2.2 - COMPENSAÇÃO DE HISTERESE

Como a válvula apresenta uma histerese acentuada, é imprescindível a existência de um compensador de histerese para que o controlador interno “enxergue” uma válvula linear.

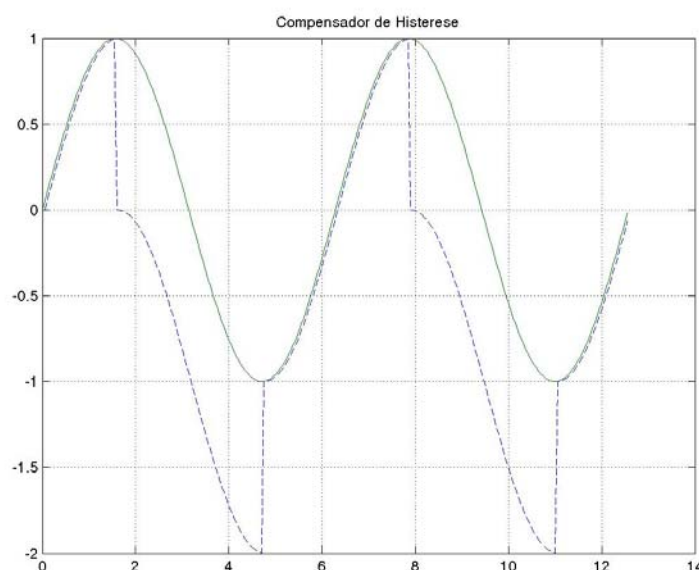
Esse compensador verifica a tendência do sinal de controle gerado pelo controlador interno e age da seguinte maneira:

1. Tendência exclusivamente de abertura: o compensador não faz nada, apenas deixa passar o sinal de controle original;
2. Tendência exclusivamente de fechamento: o compensador não faz nada, apenas deixa passar o sinal de controle original;
3. Mudança de tendência Abertura para Fechamento: o compensador subtrai 34 do sinal de controle, mantendo o sinal de controle na curva de fechamento;
4. Mudança de tendência Fechamento para Abertura: o compensador deixa de subtrair 34 do sinal de controle, mantendo o sinal de controle na curva de abertura.

A figura 7 mostra o diagrama de blocos do compensador de histerese e a figura 8 mostra a saída do bloco para uma entrada senoidal..



**Figura 7 – Diagrama de blocos do compensador de histerese**



**Figura 8 – Saída do compensador de histerese para uma entrada senoidal**

### 2.3 - CONTROLE EM CASCATA

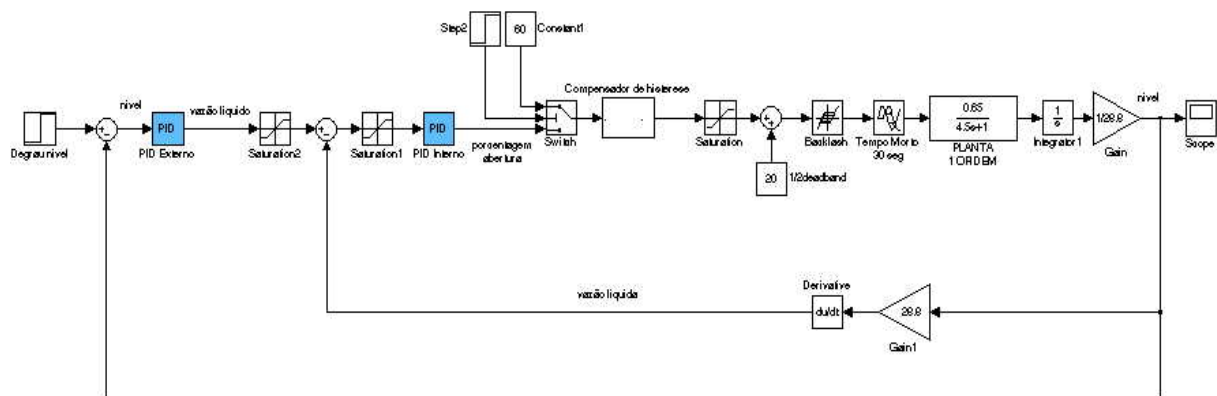
A estratégia de controle adotada foi o controle em cascata, que possui as seguintes características:

1. O sinal de saída do controlador externo serve como o set-point para o controlador interno;
2. Dois elos de controle encadeados hierarquicamente: com o elo secundário (do controlador externo) dentro do elo primário (do controlador interno).

O controle em cascata, apresentado na figura 9, surge naturalmente: ao se definir o set-point de nível. O controlador externo, baseado no erro entre nível desejado e nível real, gera um set-point de vazão líquida para o controlador interno para que ele atue na abertura da válvula até que a vazão líquida atinja o valor desejado.

### 2.4 - SIMULAÇÃO MATLAB

Para simular o comportamento do sistema controlado, implementou-se o diagrama de blocos mostrado na figura 9 na ferramenta Simulink presente no software MatLab.



**Figura 9 – Diagrama de blocos do controle**

### 2.5 - SINTONIA DOS CONTROLADORES

Utilizando o método da síntese direta [1] projetou-se o controlador interno e externo.

Deseja-se que o sistema em malha fechada responda como um sistema de primeira ordem ( $\tau_C = 15s$ ) com tempo morto igual ao tempo morto da planta (equação 3). Assim, têm-se os controladores (equações 4 e 5).

$$\left(\frac{C}{R}\right)_{desejado} = e^{-30s} \cdot \frac{1}{15 \cdot s + 1} \quad (3)$$

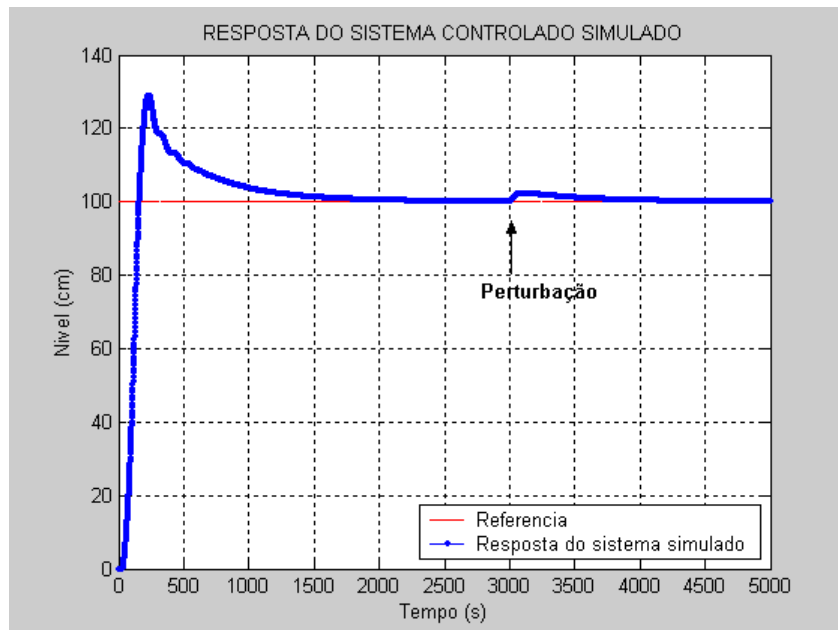
$$PI_{vazão\ líquida(int\ erno)} = 0.16 \cdot \left(1 + \frac{1}{4.5 \cdot s}\right) \quad (4)$$

$$P_{nível(externo)} = 0.63 \quad (5)$$

### 3 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Utilizando os controladores apresentados nas equações 4 e 5 no diagrama de blocos mostrado na figura 9, obteve-se a resposta vista na figura 10.

Essa resposta tem referência (set-point) de nível igual a 100 cm e uma perturbação no instante 3000 s.



**Figura 10 – Resultado da simulação**

O sistema controlado é capaz de seguir a referência, mesmo na presença de perturbações.

### 4 - IMPLEMENTAÇÃO

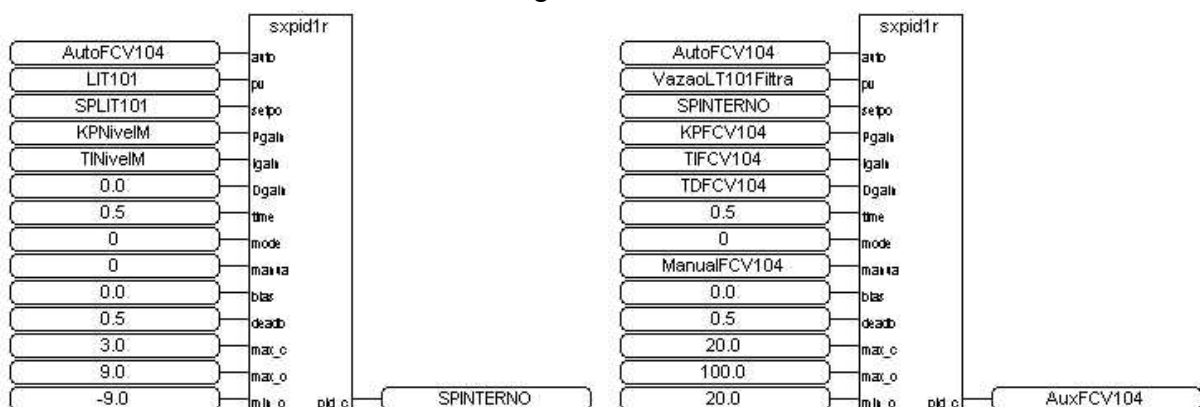
Para se implementar o sistema de controle no SoftPLC IsaGraf foi necessário criar uma estrutura para calcular a vazão líquida (equação 1), dois filtros média móvel para que os sinais de nível e de vazão líquida fossem filtrados e os dois controladores.

Os filtros média móvel são mostrados nas equações 6 e 7.

$$h_{filtrado}(k) = 0.5 \cdot h_{filtrado}(k - 1) + 0.5 \cdot h_{atual}(k) \quad (6)$$

$$Q_{filtrado}(k) = 0.5 \cdot Q_{filtrado}(k - 1) + 0.5 \cdot Q_{atual}(k) \quad (7)$$

Os controladores são vistos na figura 11.



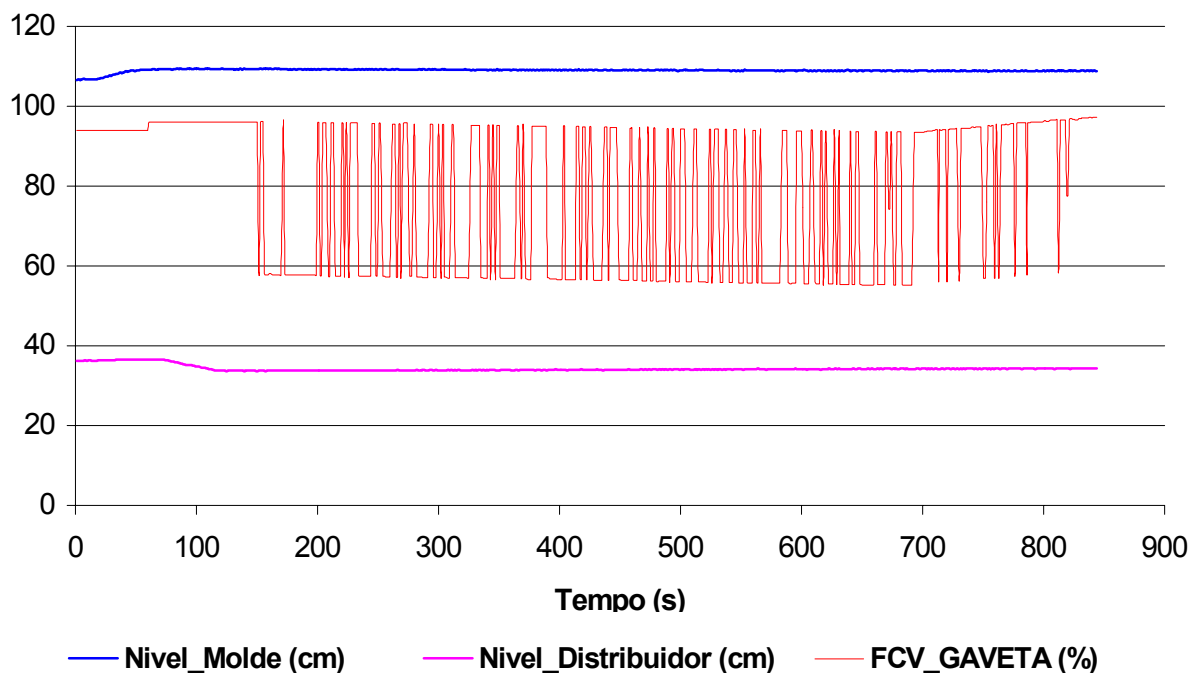
**Figura 11 – Controladores externo e interno**



## 5 - RESULTADOS OBTIDOS NO MODELO FÍSICO E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no modelo físico podem ser vistos na figura 12. Verifica-se que, com o nível do distribuidor aproximadamente constante, o sistema de controle é capaz de manter o nível do molde constante no valor da referência.

Observa-se que a válvula gaveta fica variando sua abertura continuamente em decorrência do compensador de histerese. Sempre que o compensador detecta mudança na tendência do sinal de controle proveniente do controlador externo ele atua nesse sinal, subtraindo ou não 34% - como descrito no item 2.2.



**Figura 12 – Resultados obtidos no modelo físico**

O sistema de controle apresenta uma falha: a variável controlada (nível) apresenta oscilações quando há grandes mudanças no seu set point (por exemplo, mudar o set point de nível de 100 cm para 110 cm). Essas oscilações vão diminuindo sua amplitude, tendendo ao valor do set point. Porém essa convergência é lenta.

Um possível melhoramento do desempenho do sistema de controle seria acrescentar uma estrutura feedforward [2]. Isso permitiria minimizar os efeitos das variações de vazão na saída do molde e do nível do distribuidor.

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] F.G. Shinskey. Process Control Systems: Application, Design and Tuning. McGrawHill, 3 ed., 1988.

[2] D. E. Seborg, T. F. Edgar, and D. A. Mellichamp. Process Dynamics and Control. John Wiley & Sons, 1989.

# DEVELOPMENT OF A MOULD LEVEL CONTROL SYSTEM FOR A CONTINUOUS CASTING PHYSICAL MODEL<sup>(1)</sup>

Carmela Maria Polito Braga<sup>(2)</sup>  
Carlos Eduardo Barral<sup>(3)</sup>  
Fábio Gonçalves Jota<sup>(2)</sup>  
Leonardo Antônio da Silva<sup>(4)</sup>  
Thiago Oliveira Rezende<sup>(4)</sup>  
Roberto Parreiras Tavares<sup>(5)</sup>

## ABSTRACT

Physical models are an important tool used to validate the predictions of mathematical models and also to optimise industrial systems. In continuous casting systems, physical models are used to analyse the effects of flow modifiers on the flow behaviour in tundishes. The transition of steel grades can also be studied using physical models. In this case, it is essential to simultaneously operate the tundish and the mould. To accomplish that it is necessary to control flow rates and fluid levels in these two vessels.

In the present work, a digital control system for the liquid level in the mould was developed with the purpose of operating the physical models in conditions as close as possible to the actual system. This control system is also essential for the complete integration of the system (ladle, tundish and mould).

The gate valve used in the control has two important particularities, accentuated hysteresis and high time constant. These characteristics make its control more complicated and interesting.

The strategy for controlling the mould level involves a cascade control with two controllers designed by the direct synthesis method: the slave (inner) controller for the flow loop and the master (outer) for the level loop.

**Key words:** continuous casting, mould, level control.

---

(1) Technical paper to be presented at the VIII Process Automation Seminar – ABM, October/2004–Belo Horizonte/MG

(2) Professor at the Electronic Engineering Department – UFMG;

(3) M.Sc. student at the Metallurgical Engineering Department – UFMG;

(4) Undergraduate student of Control and Automation Engineering - UFMG.

(5) Professor at the Metallurgical and Materials Engineering Department – UFMG.