

## **SUBSTITUIÇÃO DE UMA VÁLVULA LIGA-DESLIGA POR UMA DE CONTROLE NO CICLO DE VULCANIZAÇÃO DE PNEUS DE MOTOCICLETAS**

**Marcelo Macedo Matos<sup>1</sup>, Marcelo Henrique Souza Bomfim<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Senai – Cimatec/ Borrachas Vipal, Email: [matos\\_marcelo2005@ig.com.br](mailto:matos_marcelo2005@ig.com.br)

<sup>2</sup> Senai Cimatec, Email: [marcelo.bomfim@fieb.org.br](mailto:marcelo.bomfim@fieb.org.br)

### **RESUMO**

*Sistemas de vulcanização de pneus, necessitam manter a temperatura para ocorrer a transferência de calor necessária no aquecimento e ocorrer a reação termo-química do composto de borracha para obter sua cura. Muitas vezes o sistema adotado no controle de temperatura destes processos é do tipo on-off. Esta nova estratégia de controle implica em substituir essa válvula on-off por uma contínua a fim de melhorar o desempenho em uma planta de vulcanização de pneus de motocicleta convencionais mantendo a temperatura mais próximo do valor desejado, obtendo o mínimo de variação possível e consequentemente diminuindo o ciclo de vulcanização. Este trabalho propõe retirar a válvula on-off e colocar uma de controle. Como conclusão os resultados obtidos mostram que além dos ganhos na qualidade do produto também houve uma redução de consumo energético e um melhor desempenho na produtividade.*

**Palavras-chave:** *Planta de vulcanização; Controle Contínuo; Ciclo de Vulcanização;*

### **ABSTRACT**

*Tire vulcanization systems, need to keep the temperature to occur the transfer of heat needed for heating and occur thermo- chemical reaction of the rubber compound for their healing. Often the system adopted in temperature control of these processes is the on-off type. This new control strategy involves replacing this on-off valve by a continuous in order to improve performance in a vulcanization plant conventional motorcycle tires while maintaining the temperature closer to the desired value, obtaining the least possible variation and consequently decreasing the vulcanization cycle. This paper proposes removing the valve on-off and put a control. In conclusion the results show that in addition to gains in product quality there was also a reduction of energy consumption and better performance in productivity.*

**Keywords:** *Vulcanization plant; Continuous control; Vulcanization Cycle;*

### **INTRODUÇÃO**

10 e 11 de setembro de 2015 / Salvador, Bahia, Brasil

Ao encontrar ótimos trabalhos que retratam sobre vulcanização de pneus<sup>(1)</sup>, modelos numéricos aplicados a vulcanização<sup>(2)</sup>, estabilidade das propriedades<sup>(3)</sup>, processo de curas de pneus<sup>(6)</sup>, em que contestam a presença de fenômenos para obter sua performance de cura e que a maioria destes trabalhos ou artigos não comentam que os sistemas de vulcanização destes processos utilizam uma válvula de vapor do tipo liga-desliga e as perdas de um sistema térmico. Esta abordagem consiste em algo inédito, que até então não foi encontrado material ou citações em revista científicas retratando o assunto através de análise e avaliação da substituição de uma válvula liga-desliga de vapor por uma de controle, utilizando uma estratégia de PID para o ciclo de vulcanização. Caetano (2014) mostrou em seu trabalho que o pneu é constituído por uma grande diversidade de componentes e por um grande número de materiais compósitos com características diferenciadas. No entanto, observa-se que alguns problemas relacionados com a vulcanização acontecem, devido a estrutura do pneu sofrer acentuadas variações de espessura.

Pinheiro (2001) afirma que o pneu não é simétrico do ponto de vista da vulcanização e que além dessas variáveis citadas, similarmente durante o processo de vulcanização, surgem problemas relacionados com a condensação de vapor nas partes internas da câmara de vulcanização.

Para resolver este problema relacionado a perda de temperatura devido o pneu ter variações de espessuras e por surgir condensação de vapor no interior do bladder, modelos numéricos matemáticos foram aplicados separadamente a reação termo-química como também a transmissão de calor afim de melhorar a performance de vulcanização, como também a adição de óxidos de zinco para obter maior estabilidade dos compostos de borracha e também minimizar ou retardar seu envelhecimento pós-vulcanizado. Assim, este trabalho de pesquisa diferencia pois aborda o ajuste teórico utilizando técnicas de controle PID, consistindo em calcular um valor de atuação sobre a variável de processo aquecimento (vapor).

O objetivo é garantir um maior controle, fazendo com que a saída fique mais estável minimizando o erro ao valor de temperatura desejável obtendo ganhos já que com a temperatura mais controlada e com perda praticamente nula o tempo de cura pode ser diminuído. A Figura 01 apresenta a variação típica de temperatura e pressão num ciclo de vulcanização de pneus, pela figura pode ser visto que segue-se uma sequência de tempos, temperaturas e pressões, com entradas de fluidos, troca de fluidos, até aos momentos finais do ciclo, com o corte de alimentação dos fluidos de pressão e de aquecimento (CAETANO, 2014).

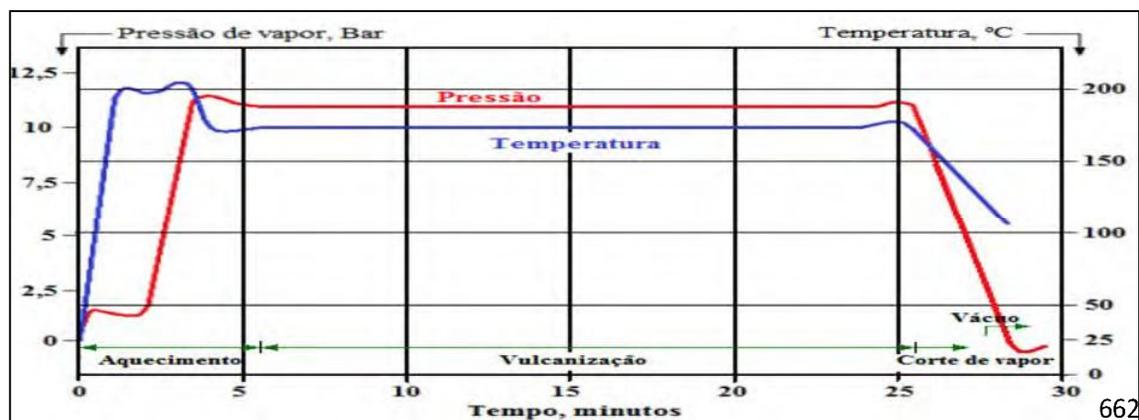


Figura 01: Variação típica de pressão e temperatura num ciclo de vulcanização de pneus

Fonte: (CAETANO, 2014)

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Arco de borracha, aro de borracha, claramente mais conhecido como pneu, pode ser definido como um produto de borracha que pode ser inflado e reforçado com diversos materiais para a rodagem de veículos como carros, caminhões, motocicletas, bicicletas e até mesmo por carrinhos de mão (SANTOS & AGOSTINHO, 2010).

A Figura 02 apresenta um corte no pneu com seus principais componentes e estruturas.



Figura 02: Estrutura de um pneu de motocicleta

Fonte: *Moto.com.br*

Nesse contexto, o presente trabalho tem a finalidade de analisar e validar melhorias em função de uma situação que ocorre no que diz respeito ao fenômeno de transmissão de calor durante o ciclo de vulcanização.

Pinheiro (2001) explica que dois fenômenos acontecem em paralelo quanto a vulcanização, sendo a reação termoquímica entre o enxofre e as cadeias poliméricas que promove a cura da borracha e a transmissão de calor entre os fluidos de aquecimento diante do conjunto constituído por molde, pneu e câmara de vulcanização. No entanto, cabe ressaltar que o fenômeno da transmissão de calor é complexo de modelar devido a variações de espessuras que compõem o pneu (anisotropia Térmica) e ao fato da borracha possuir baixa condutibilidade térmica, sofrendo variações de temperatura na parte interna durante a cura. Já o molde ou cúpula, por ser constituído por aço e alumínio em sua estrutura, auxilia na vulcanização por não perder temperatura externa por ser 240 vezes melhor condutor de calor que a borracha.

Pinheiro (2001) ressalta ainda que a câmara de vulcanização (bexiga, bladder ou CV) constituída de borracha, sofre a vapor sobpressão saindo de uma geometria não tensionada para uma segunda geometria, onde a CV ganha diâmetro externo e simultaneamente diminui suas espessuras. Assim, essas variações dependem de cálculo para determinar espessuras

10 e 11 de setembro de 2015 / Salvador, Bahia, Brasil

corretas para CV e um mau dimensionamento desta espessura e dimensão pode representar perdas de temperatura interna no pneu em um processo de vulcanização (PINHEIRO, 2010). De fato, o fenômeno relacionado a transmissão de calor e o fato do sistema ser térmico com uma válvula liga-desliga são fatores favoráveis a perda de temperatura.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O campo de estudo é o setor de vulcanização da planta de pneus de moto em uma fábrica do segmento de borrachas localizada na cidade de Feira de Santana BA, que além de fornecer recapagem ou reforma também produz pneus de motocicleta convencional. A capacidade desta planta de pneus é para uma produção de 5.000 pneus/dia nos modelos Street, Trail, Cross e Tubeless (unicamente sem câmara).

Os tempos de vulcanização dependem da dimensão, da estrutura, das características dos compostos utilizados, dos tipos de prensas e fluidos de aquecimento. (CAETANO, 2014) Os modelos Street possuem os tempos de 9 minutos e 45 segundos, os modelos Trail 14 minutos e 45 segundos, as medidas Tubeless e Cross possuem tempos de 15 minutos e 45 segundos.

A figura 03 representa como o sistema de vulcanização funciona através da válvula liga-desliga de vapor.

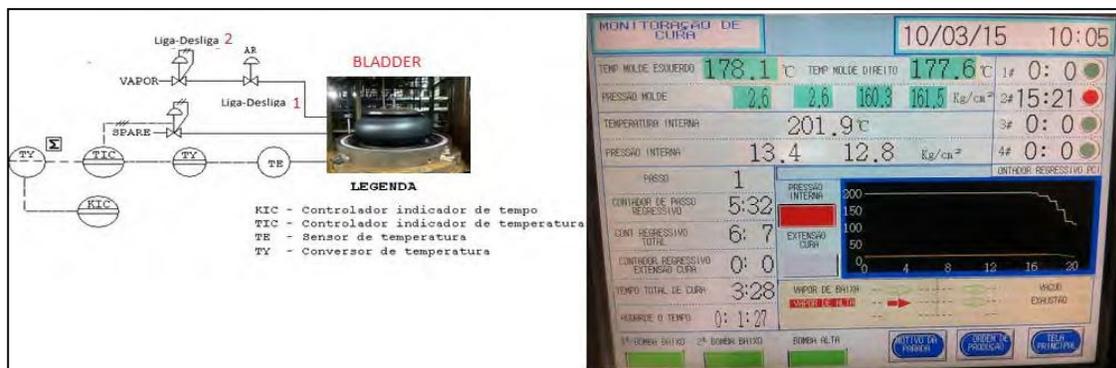


Figura 03: (a) Diagrama esquemático da câmara de vulcanização de pneus de motocicletas e (b) IHM que apresenta os parâmetros de controle durante a vulcanização.

A esquerda da Figura 03 (a) apresenta um diagrama esquemático do processo onde está localizado a válvula liga-desliga (1) de ar comprimido e a válvula liga-desliga (2) de vapor, a foto mostra uma cavidade apenas do bladder localizado sobre a parte inferior do molde.

A direita da Figura 03 (b) apresenta os parâmetros de temperatura do molde esquerdo e direito, pressão do molde, temperatura interna, pressão interna, ambos no bladder, seguidos pela sequência dos passos e contagem de cura juntamente com um gráfico indicado.

A válvula (1) liga-desliga de ar comprimido tem a finalidade obter duas conformações que irão ter a função de enformar o pneu-verde, sendo a 1ª conformação a uma pressão de 0,5 bar ocorrendo na 1ª pausa durante o fechamento da prensa e a segunda conformação de 1.0 bar na 2ª pausa com a prensa totalmente fechada, após isso, a válvula (2) liga-desliga de vapor irá abrir para obter pressão e temperatura, sendo 14 bar e 200°C, dentro do bladder. A

temperatura e pressão no interior do bladder inicia em torno de 100 °C e 0 bar até atingir a forma especificada durante o tempo de cura e a temperatura externa do molde encontra-se com 178 °C conforme especificação desta planta.

Na tubulação de saída do bladder encontra-se também um transmissor de temperatura (PT-100 -15° C a 230° C) e uma válvula proporcional “spare”, cujo o controle de funcionamento para manter a temperatura no interno do bladder acontece da seguinte forma.

O vapor entra no bladder, durante os 2 minutos iniciais da contagem do tempo de cura, a válvula “spare” permanece normalmente fechada de 0 a 8 segundos iniciais fazendo a temperatura interna subir. Após isso, a válvula “spare” fica normalmente aberta de 9 a 20 segundos retirando resíduos, condensado e ar de dentro do bladder, depois mantem-se fechada de 21 a 120 segundos contínuos da contagem do tempo de cura, onde somente irá abrir se caso a temperatura no interno do bladder for menor que o setpoint estipulado de 185°C.

A figura 04 nos fornece a resposta da temperatura interna ocorrendo durante os 20 primeiros segundos do ciclo de vulcanização.

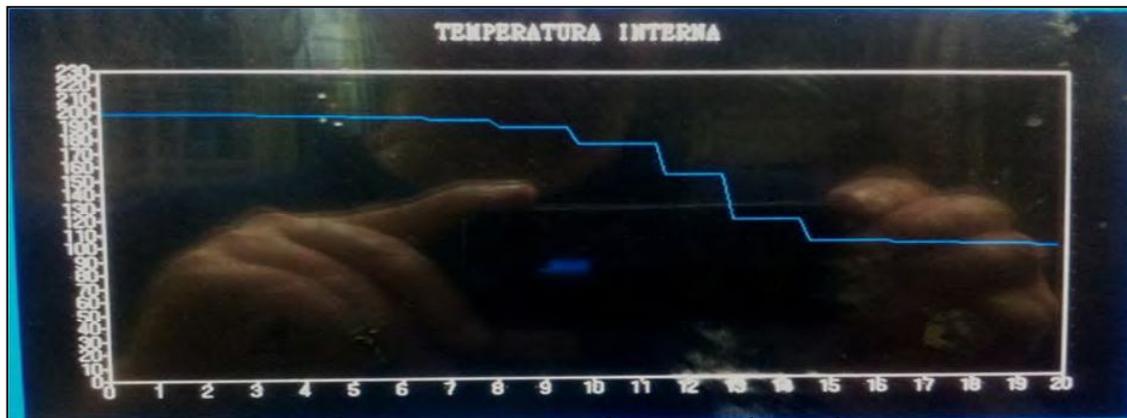


Figura 04: Temperatura Interna da Prensa Vulcanizadora

Para validar este processo a análise constitui em substituir a válvula (2) liga-desliga de vapor por um controle PID para deixar a temperatura mais estável dentro do bladder para minimizar a condensação de vapor e evitar perda de temperatura. A modelagem matemática utilizada segue as regras do Primeiro Método de Ziegler e Nichols para sistema de primeira ordem já que se trata de um sistema térmico. A figura 05 nos mostra a mesma temperatura interna encontrada na figura 4 (IHM) porém já plotada em Matlab para serem encontrados os valores conforme PMZN.

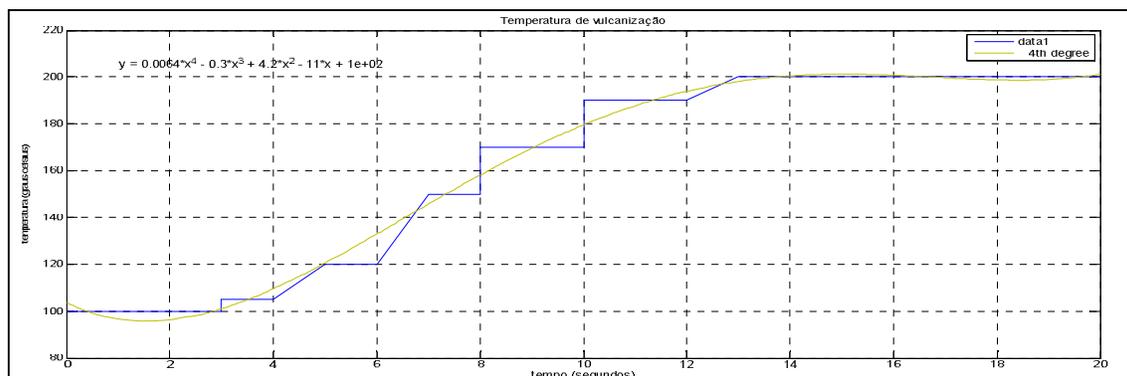


Figura 05: Gráfico Temperatura Interna retirado IHM e plotado em Matlab

Desta forma, as curvas de resposta característica de sistemas térmicos são tipicamente de primeira ordem, não apresentando sobresinal.

O método utilizado para sintonia do controlador PID emprega resposta do processo em malha aberta a uma entrada degrau, obtendo determinada curva de resposta e nela uma reta tangente pelo ponto de inflexão da curva conforme figura 06, chegando através de métodos gráficos aos valores do atraso de tempo “L” e a constante de tempo “T” e o ganho “K”. De posse disto, pode-se usar a Tabela 1 de acordo com os parâmetros de Ziegler-Nichols para o cálculo do Controlador PID. (SILVA, 2012)

Tabela 1: Cálculo dos parâmetros do controlador PID.

Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

## MODELAGEM DO SISTEMA

Através da figura 06 podemos identificar os valores, L, T e K e obter a função transferência da planta.

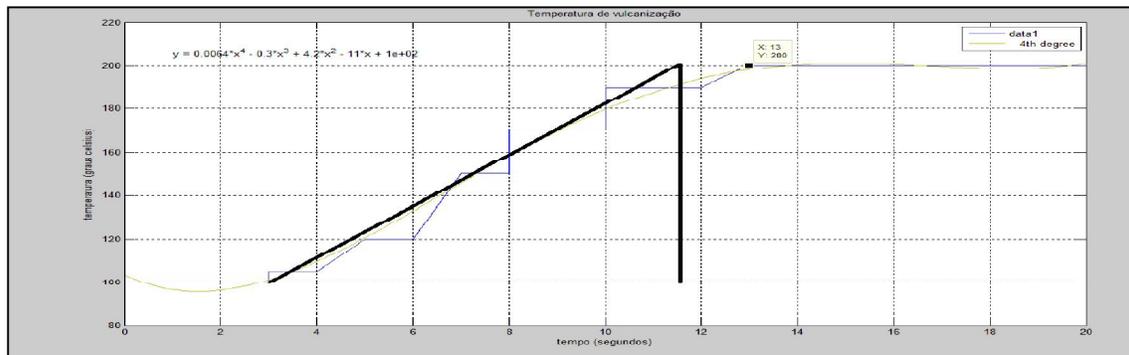


Figura 06: PMZN aplicado ao gráfico de resposta do sistema a um degrau de 200 graus celsius de temperatura.

Pela Figura 06 têm-se que: Os eixos “x” e “y” estão os valores  $x = 13$  e  $y = 200$

Ganho estático  $K = 200/9.8 = 20.4$  ;

$L =$  Tempo de atraso = 3.2 seg.;

$T =$  Constante de tempo =  $13 - 3.2 = 9.8$  seg.

Função de transferência da planta =  $20.4 * e^{-3.2s} / (9.8s + 1)$ ;

Aplicando um degrau de 200 graus celsius têm-se:

A Figura 07 apresenta a resposta transitória do sistema quando submetido a uma entrada em degrau, o erro é apresentado e por se tratar de um sistema de primeira ordem do tipo 0.



Figura 07: Resposta ao degrau da planta em malha aberta, a curva se estabiliza em torno de 41,5 segundos e o pico chega em 199° C.

**Cálculo ERRO e(ss):**

$$K = \lim_{S \rightarrow 0} G(s) = \frac{20,4 * e^{-3,2 S}}{9,8 s + 1} \quad (c) e(ss) = \frac{1}{K+1} = \frac{1}{20,4 + 1} = \frac{1}{21,4} = 0,05$$

$$K = \lim_{S \rightarrow 0} G(s) = \frac{20,4 * e^{-3,2(0)}}{9,8(0) + 1} = 20,4 \quad (d) e(ss) = 5\%$$

A função transferência da planta não possui integrador no seu denominador caracterizando um sistema de 1º ordem do tipo 0, sendo assim e aplicando uma entrada degrau esse sistema sempre irá existir erro ocasionando perda de temperatura.

No caso da função transferência da planta, a vulcanização do pneu que se inicia em 200 ° C ocorre uma perda de 5% deixando a resposta da temperatura em torno de 190 ° C sendo mais um fator que determina perda de temperatura além dos citados no último parágrafo do capítulo da revisão bibliográfica.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Substituindo os valores de  $L$  e  $T$  na Tabela 2 proposta pelo PMZN, chega-se aos valores melhorados dos parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  para cada tipo de controlador (SILVA, 2012).

Tabela 2 – Valores Calculados para cada tipo de controlador pelo PMZN

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
PID	3,68	6,40	1,60

Diante destes dados serão simulados em MATLAB as respostas para confirmação de como se comportará a dinâmica do processo com a nova implementação da melhoria.

$$\text{Formula: PID}(s) = K * \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$$

$$\text{Equação 1: PID} = 3,68 * \left(1 + \frac{1}{6,40s} + 1,60 s\right) \quad (1)$$

As Figuras 08 e 09 apresentam os parâmetros das funções do bloco PID de controle e o diagrama em blocos. Fonte MATLAB

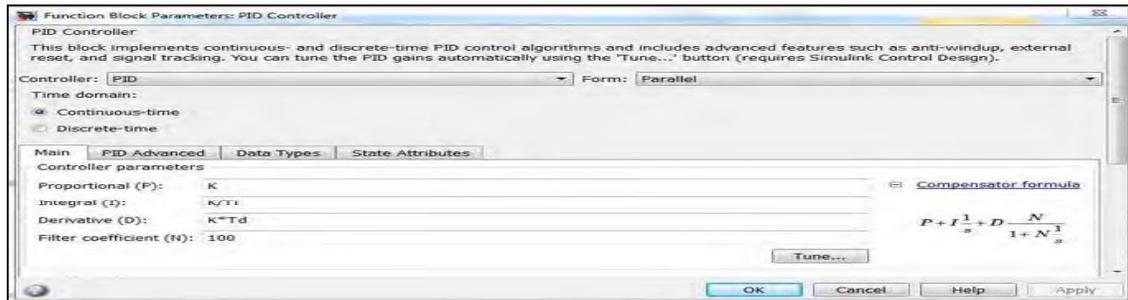


Figura 08: Bloco PID definindo os parâmetros

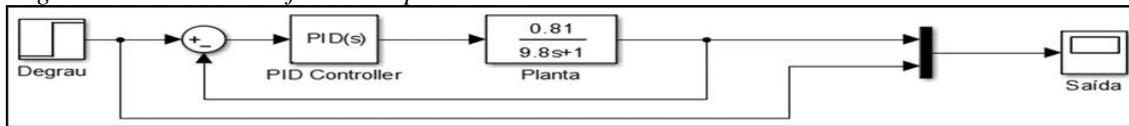


Figura 09: Diagrama de blocos da representação Simulink Matlab

A Figura 10, mostra através do scope pelo Simulink MATLAB que o controlador PID atinge a temperatura desejada e um tempo de estabilização sem muito excessos, ou seja, a resposta se estabiliza em 11 segundos obtendo um ganho de quase 30% no tempo de resposta comparada a resposta da planta que antes estava em torno de 41,5 segundos.

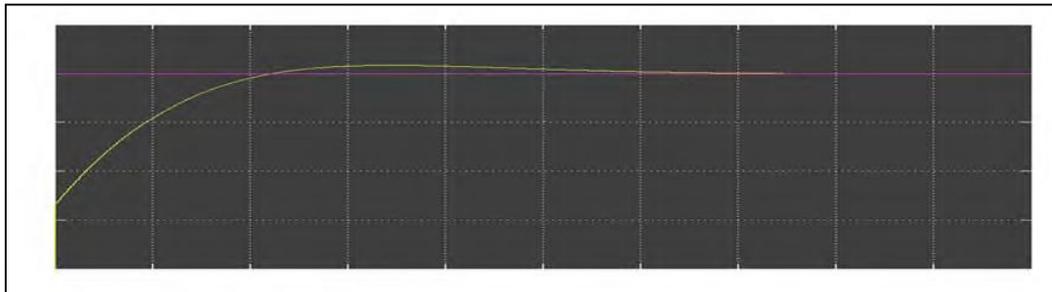


Figura 10: Resposta ao PID aplicado a planta malha fechada. Simulink MATLAB

Além de apresentar um ótimo resultado como mencionado esse maior controle da temperatura no interno do bladder pode ser beneficiado em ganhos de produtividade reduzindo o tempo de cura. (CAETANO, 2014) mostra, que a representação de  $\log K$  em função de  $1/T$  é uma linha reta, cujo declive corresponde à energia de ativação  $E_a$ . Isso possibilitará ser calculada a energia de ativação para todos os compostos utilizados na fabricação do pneu. Observa-se também que os compostos utilizados durante os ensaios realizados apresentavam energias de ativação compreendidos entre 18,64 e 20,71 kcal.mole<sup>-1</sup>.

Na literatura ou em cálculos demonstrados pela equação de Arrhenius, foram encontrados valores de 20 kcal/mol e de 24 kcal/mole (para uma série de compostos para pneus). Seu conjunto, o valor médio dos vários compostos aproxima-se de 22 kcal.mole<sup>-1</sup> que é o valor que pode ser considerado na construção da figura 11, onde são mostrados, para temperaturas compreendidas entre 100°C e 204,5°C, os fatores que permitem a determinação dos tempos de vulcanização equivalentes ao tempo de vulcanização considerado base, de 1 minuto a 143°C (290°C). Estas referências citadas requer um estudo mais aprofundado sobre o domínio do assunto e será recomendado como trabalhos futuros.

Exemplo: Uma vulcanização de 85 minutos a uma temperatura de 114°C é equivalente a uma vulcanização de  $85 \times 0,1361 / 6,6932 = 1,73$  minutos a 175°C. A primeira parte do cálculo (de  $85 \times 0,1361$ ) corresponde à determinação do tempo equivalente à vulcanização a uma temperatura de 143°C; ao dividir pelo fator correspondente a 175°C (6,6932), obtemos o tempo de vulcanização correspondente a esta temperatura. (CAETANO, 2014)

A figura 11 apresenta tempos equivalentes e alguns exemplos que a determinação de tempos de vulcanização é possível. (CAETANO, 2014)

°C	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
100	0,0465	0,0484	0,0503	0,0524	0,0545	0,0567	0,0589	0,0613	0,0637	0,0662
105	0,0689	0,0716	0,0744	0,0773	0,0803	0,0835	0,0867	0,0901	0,0936	0,0972
110	0,1009	0,1048	0,1088	0,1130	0,1173	0,1218	0,1264	0,1311	0,1361	0,1412
115	0,1465	0,1520	0,1577	0,1635	0,1696	0,1759	0,1824	0,1891	0,1960	0,2032
120	0,2106	0,2183	0,2262	0,2344	0,2429	0,2517	0,2607	0,2701	0,2798	0,2898
125	0,3001	0,3107	0,3217	0,3331	0,3449	0,3570	0,3695	0,3824	0,3958	0,4096
130	0,4238	0,4384	0,4536	0,4692	0,4854	0,5020	0,5192	0,5369	0,5551	0,574
135	0,5934	0,6135	0,6341	0,6554	0,6774	0,7001	0,7234	0,7475	0,7723	0,7979
140	0,8242	0,8514	0,8793	0,9082	0,9379	0,9865	1,0000	1,0325	1,0659	1,1003
145	1,1358	1,1723	1,2099	1,2486	1,2885	1,3295	1,3718	1,4152	1,4600	1,5060
150	1,5534	1,6021	1,6523	1,7039	1,7570	1,8116	1,8678	1,9256	1,9850	2,0462
155	2,1090	2,1737	2,2401	2,3084	2,3787	2,4509	2,5251	2,6014	2,6798	2,7604
160	2,8432	2,9283	3,0158	3,1056	3,1979	3,2928	3,3902	3,4903	3,5930	3,6986
165	3,8070	3,9183	4,0327	4,1500	4,2706	4,3943	4,5213	4,6517	4,7856	4,9230
170	5,0640	5,2087	5,3572	5,5096	5,6660	5,8264	5,9911	6,1599	6,3332	6,5109
175	6,6932	6,8802	7,0719	7,2686	7,4703	7,6771	7,8892	8,1068	8,3295	8,5580
180	8,7923	9,0325	9,2786	9,5309	9,7895	10,0545	10,3261	10,6044	10,8896	11,1818
185	11,4811	11,7878	12,1020	12,4239	12,7536	13,0913	13,4372	13,7914	14,1542	14,5257
190	14,9061	15,2956	15,6945	16,1028	16,5209	16,9488	17,3869	17,8354	18,2944	18,7643
195	19,2451	19,7372	20,2408	20,7561	21,2834	21,8230	22,3750	22,9398	23,5176	24,1087
200	24,7133	25,3318	25,9644	26,6114	27,2731	27,9498	28,6419	29,3496	30,0732	30,8131

Figura 11: Fatores para determinação de tempos equivalentes de vulcanização

## CONCLUSÃO

Nota-se que o sistema apresenta um erro de 5% entre a resposta transitória do sistema quando submetido a uma entrada em degrau mostrando o sistema estabilizando no tempo de 41,5 segundos.

A substituição da válvula de controle on-off pela de controle PID mostrou-se satisfatória, pois o erro em regime permanente foi reduzido consideravelmente a zero e a resposta do sistema apresentou-se mais rápida e estável em torno de 11 segundos.

Com o controle da válvula de vapor a variável do processo fica mais estável e acurada na parte interna da câmara de vulcanização mantendo a temperatura interna entre 195° a 200 °C durante todo o ciclo de vulcanização.

A Tabela 3 é uma planilha de simulação elaborada em Excel que através dos dados de tempo de cura e temperatura atual em graus Celsius obtidos podemos encontrar o tempo de cura e temperatura estimado para ocorrer a equivalência, porém testes com termopares também deverão ser realizados para obter comprovação mais precisa.

Tabela 3: Cálculo equivalente X Tempo de Cura

Cálculo equivalente versus tempo de cura						
TEMP.°F	Equação Arrhenius		Tempo de Cura Minutes		Transformar de °C para ° F	
383	1,74	43,9	Estimado	7,73	195	383
374	1,51	43,9	Atual	9,75	190	374

Conforme a demonstração feita na tabela 3 e a análise e avaliação de substituir uma válvula (liga-desliga) por uma de controle PID, possibilita um ganho de produtividade da planta já que o tempo de cura estabelecido anteriormente de 09 minutos e 45 segundos na linha street a uma temperatura de 190 °C pode ser reduzido para 07 minutos e 44 segundos com uma temperatura encontrada de 195°C/200°C. Isso representa 20 % de redução do tempo e consequentemente um melhor desempenho energético minimizando perdas e desperdício de vapor ao aquecimento interno da câmara de vulcanização e aumentando a produção da linha street.

Vale salientar que com a nova resposta do sistema e para obter o tempo de cura menor o composto de borracha deve ser trabalhado para responder a esse novo processo sem ocorrer problemas na sua reação antes, durante e depois a vulcanização. Esse e outros complementos serão abordados em uma nova oportunidade de estudo futuros

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma sugestão de atividade futura é descobrir mais sobre o processo de vulcanização de pneus, métodos de termopar e equação de Arrhenius, para entender melhor sobre tempos de vulcanização equivalentes para o levantamento mais preciso do modelo de primeira ordem da planta, o que fornecerá uma melhor sintonia do controlador PID.

## 7. AGRADECIMENTOS

A empresa Borrachas Vipal, por acreditar que o conhecimento científico aplicado dentro da indústria pode trazer resultados significativos para toda a sociedade e aos professores do curso pós-graduação especialização Automação, Controle e Robótica pelas orientações em relação a este trabalho.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAETANO, M. J. *Vulcanização de Pneus*. Fonte: Ciência e Tecnologia da borracha: <http://www.ctborracha.com> Acesso de Abril a Julho (2014).
- [2] PINHEIRO, E. G. Modelos Numéricos Aplicados a Vulcanização de Pneus. *Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, (2010). p. 125.
- [3] RODRIGUES, E. B. (S/Data de S/Data de 2010). Estudo da estabilidade das propriedades mecânicas e químicas de compostos de borracha vulcanizados com enxofre após envelhecimento térmico e oxidativo. *Dissertação (Mestrado)*, p. 68.
- [4] SANTOS, S. S., & AGOSTINHO, T. C. A Reciclagem de Pneus Inservíveis. *Trabalho de Curso (Graduação em Gestão Empresarial) – Curso de Administração, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha*, (S/Data de S/Data de 2010). p. 70.