

ELEMENTOS CRÍTICOS EM UM SISTEMA DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

SANTOS, L. M.^{*}, AMORIM, M. F.[†], ALTAFIM, R. A. P.[‡], CAVALCANTI, A. C.[§]

**Centro de Informática - CI
CTDR, R. dos Escoteiros, s/n, CEP 58.055-000
Mangabeira, João pessoa, PB, Brasil*

Emails: leandro.mendes@eng.ci.ufpb, mdsamorim@gmail.com, altafim@gmail.com,
antoniocarloscavalcanti0@gmail.com

Abstract— Overload protection systems have been used for many years in electrical devices to avoid severe damages in equipment, electrical circuits and sub-circuits. The most traditional protection systems are based on passive elements such as fuses, which presents a low cost and can be discarded once is damaged. Alternative protection systems are based on active circuits, which employs an actuator to interrupt the current flow. Normally, these actuators are implemented with electromechanical relays or solid-state transistors, such as a MOSFET that presents response time in the order of milliseconds. However, even this small reaction time is sufficient to allow an overcurrent to flow through the electrical circuit and cause damages. Aiming identify critical faults in active protection systems, which tends to reduce their response time, in this work an analysis was performed on a three stages (acquisition, comparison and actuation) protection system. A series of component test was performed separated on each stage to obtain its critical response time. Further a complete protection system was implemented with the best component configuration and the overall response time was compared with the total sum of each separated stage. Besides, the proposed analysis shows that it is possible to obtain reduced response time using low cost discrete circuitry.

Keywords— Fault protection systems, low time response, overload, fast response devices, short-circuit.

Resumo— Circuitos para proteção de sobrecarga são utilizados há muito tempo com o objetivo de evitar danos a equipamentos, circuitos e sub-circuitos. Os sistemas tradicionais de proteção são passivos e utilizam fusíveis que são descartáveis e de baixo custo. Nos sistemas ativos, há a necessidade de atuadores para efetuar a interrupção da corrente. Nesses sistemas, os atuadores podem ser relés eletromecânicos e de estado sólido ou transistores MOSFET. Para esses atuadores, os tempos de resposta são da ordem de milissegundo. Porém, antes que a interrupção ocorra, a corrente de sobrecarga circula pelo sistema podendo causar danos. Com o objetivo de avaliar circuitos de proteção ativos e identificar os componentes críticos, foi proposto um circuito eletrônico de três estágios baseados em circuitos tradicionais: aquisição, comparação e atuação. A avaliação do circuito foi efetuada de forma compartimentada para identificar as etapas com tempos críticos/proibitivos. A partir dessa análise, ficou objetiva a escolha adequada dos componentes de acordo com suas funções. Com base nos ensaios com diversos componentes, o circuito implementado resultou em um desempenho de ação ultra-rápida. Além disso, a análise proposta permite mostrar que é possível obter um tempo de resposta reduzido usando componentes discretos de baixo custo.

Palavras-chave— Circuito de proteção, tempo de resposta, sobrecarga, dispositivo de ação rápida, curto-circuito.

1 Introdução

Circuitos para proteção de sobrecarga são utilizados há bastante tempo com o objetivo de evitar danos a fontes de alimentação, superaquecimentos em componentes eletrônicos ou até mesmo avarias em circuitos intermediários de um sistema elétrico.

Os sistemas de proteção passivos utilizam fusíveis, que é uma alternativa de baixo custo. Entretanto, como são descartáveis, os circuitos protegidos ficam fora de operação até que sejam fisicamente substituídos ou, o que é pior, são destruídos antes que os fusíveis se rompam. Em seus diferentes tipos, os tempos de resposta de atuação são da ordem de milésimo de segundo (Tuite 2014), como por exemplo, o fusível de ação rápida BUSMANN GMA-R 200 mA que interrompe a corrente em um tempo superior a 10 ms quando a corrente atinge 0,8 A (Bussmann 2010).

Já os sistemas de proteção ativos têm a vantagem de serem reinicializáveis, automática ou manualmente, dependendo dos circuitos utiliza-

dos (Texas 2008). Nesses sistemas, a etapa final do circuito é o atuador, responsável pela interrupção da corrente (Micrel 2005). Como componente atuador, os sistemas ativos utilizam relés eletromecânicos, relés de estado sólido e transistor MOSFET (National Instruments 2015). Os relés eletromecânicos, embora sejam eficientes na interrupção de corrente, apresentam limitações quanto ao seu tempo de atuação, além de produzirem interferências eletromagnéticas e poderem causar arcos voltaicos (National Instruments 2015), que são extremamente prejudiciais aos sistemas elétricos. Como alternativa aos relés eletromecânicos, os relés de estado sólido têm a vantagem de serem mais rápidos por não apresentarem partes mecânicas. Entretanto, por se tratar de semicondutores, os relés de estado sólido apresentam uma resistência de condução maior que a dos contatos dos relés. O tempo de interrupção de um relé eletromecânico pode variar de 5 ms a 15 ms enquanto que nos relés de estado sólido esse tempo é da ordem de 1 ms (National Instruments 2015). Embora a resposta

de atuação de um relé seja considerada rápida, esse curto período de tempo é suficiente para que a corrente de sobrecarga continue circulando pelo sistema e cause danos (Kojovic e Witte 2001), principalmente em circuitos eletrônicos de baixa potência, como por exemplo, os presentes nos smartphones e dispositivos eletrônicos portáteis (Slade et al. 2005; Tuite 2014). Contudo, nos sistemas de alta potência, os danos causados têm maiores proporções podendo ocorrer o desligamento permanente da rede elétrica. Dessa forma, para que haja um mínimo de prejuízo ao circuito ou sistema em proteção, por ocorrência de uma sobrecarga, o tempo de desligamento deve ser o menor possível (Silva et al. 2012).

Visando projetar circuitos de proteção mais eficientes, foram desenvolvidos circuitos integrados (CI) específicos para essa tarefa. Como exemplo, pode-se citar o LM317, da Texas Instrument, que limita a corrente de sobrecarga (Texas 2014), o MIC5013 da Micrel Semiconductors que possui a funcionalidade de proteção fornecendo um sinal de saída para um atuador com tempo de 60 μ s (Micrel 2005) e BQ24315 também da Texas Instrument, com tempo de atuação de 176 μ s (Texas 2008). Além desses, outros dispositivos dedicados a fontes chaveadas e que protegem diferentes níveis de tensão atuam como supervisor da modulação do PWM. Entretanto, seu tempo típico de resposta não é inferior a 180 ms (ChipGoal 2007; Davis 2016).

A busca por circuitos rápidos para proteção de sobre-corrente tem mostrado que a utilização de MOSFET oferece resultados cada vez mais rápidos, com tempos de resposta inferiores a 10 μ s (Yuasa et al. 2010; Wang et al. 2014; Jones et al. 2017).

Buscando avaliar circuitos de proteção ativos e identificar os componentes críticos quanto aos tempos de resposta, foi proposto nesse trabalho um circuito eletrônico tradicional de três estágios contemplando: aquisição do sinal de corrente, comparação com a corrente de proteção e estágio de atuação para interrupção da sobre-corrente.

A avaliação do tempo de resposta desse circuito foi realizada separadamente em cada estágio, permitindo uma melhor identificação dos pontos críticos do circuito.

2 Descrição e análise do circuito de proteção

Para melhor avaliar o tempo de resposta total do circuito de proteção contra sobrecarga, dividiu-se a abordagem em três blocos funcionais: etapa de aquisição e condicionamento do sinal de corrente, etapa de comparação para fornecer a indicação de excesso de corrente e etapa de atuação, como apresentado na Figura 1. Essa divisão é semelhante à descrita por Wang (Wang et al. 2014), porém no

presente trabalho, explicitou-se o tempo em que de fato a carga deixa de receber tensão de alimentação.

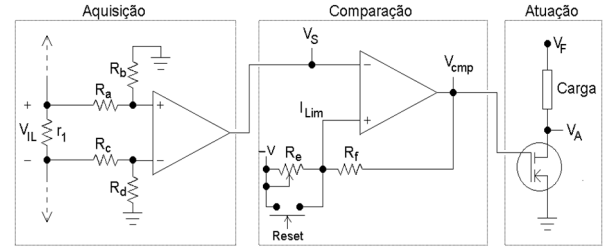


Figura 1: Diagrama do circuito implementado para proteção de sobrecarga, composto por três estágios: aquisição e condicionamento do sinal, comparação e atuação.

2.1 Aquisição e Condicionamento do sinal

Nessa etapa, o sinal de corrente é convertido para tensão fazendo-se a corrente de carga (I_L) circular através de um resistor (r_1). A tensão que surge em r_1 (V_{IL}), proporcional à corrente I_L , deve ser pequena para ser considerada desprezível em relação à tensão da fonte (V_F). Para isso, r_1 deve ter baixo valor e ser suficientemente capaz de dissipar potência provocada por I_L , e nesse caso foi de 0,1 Ω e 10 W.

Finalizando a preparação desta etapa, o valor de V_{IL} que surge sobre r_1 foi amplificado, com ganho A , resultando em V_S segundo a expressão (1) (Bogart e F. 2001).

$$V_S = \frac{R_d(R_a + R_b)}{R_a(R_c + R_d)} V_{IL}^+ - \frac{R_b}{R_a} V_{IL}^- \quad (1)$$

Os resistores R_a, R_b, R_c e R_d foram escolhidos para que A fosse igual 23.

A Figura 2 ilustra o diagrama da etapa de aquisição e condicionamento do sinal da corrente.

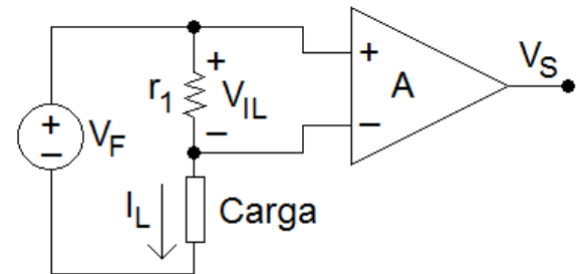


Figura 2: Diagrama do circuito de aquisição e condicionamento da corrente de carga.

O tempo de resposta para a aquisição e condicionamento do sinal de corrente (t_A) foi caracterizado pela soma de duas medidas a partir do início da corrente de sobrecarga (I_{CC}): o tempo que o

amplificador leva para começar a responder (t_{1a}) e, a partir de então, o tempo (t_{2a}) para atingir a corrente limite (I_{Lim}) para o desligamento do circuito. Para reduzir o erro na medida de t_{1a} , será considerado que o início da resposta do amplificador se dará quando sua saída atingir 10% do valor da corrente limite ($I_{10\%Lim}$).

A Figura 3 ilustra a caracterização para a medida do tempo de resposta da primeira etapa.

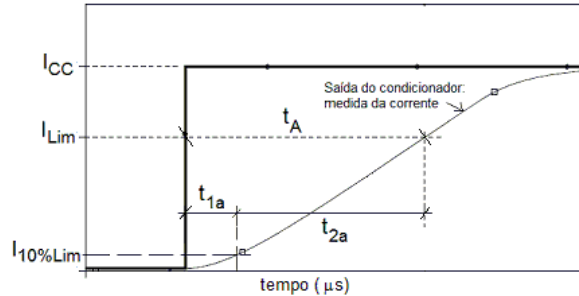


Figura 3: Caracterização do tempo de resposta para a medida da corrente.

2.2 Comparador

O sinal de saída de tensão (V_S) da aquisição representa a corrente na carga I_L que, depois de condicionado, é aplicado à entrada do comparador. Uma configuração de comparador com histerese foi adotada neste trabalho. Em funcionamento normal, i.e. $I_L < I_{Lim}$, a saída do comparador se manterá em estado de saturação (V_{Sat} – ativado). Quando uma condição inversa for detectada, $I_L > I_{Lim}$, o comparador deverá alterar seu estado, levando o sinal de saída para o valor nulo (desativado). A histerese foi ajustada de modo a impedir que o comparador volte à saturação após ser desativado. Adicionalmente, implementou-se um botão de *reset* para permitir a reativação do comparador.

Nessa etapa, para o comparador indicado na Figura 1 baseia-se nas equações (2) e (3) (Bogart e F. 2001) para se definirem os valores dos resistores R_e e R_f de modo a impor a inversão do comparador. Aqui, esses valores foram ajustados para uma $I_{Lim} = 800$ mA.

$$V_{Low} = \left(1 - \frac{R_e}{(R_e + R_f)}\right) V \quad (2)$$

$$V_{Low} = \frac{R_e(V_{SAT} + V)}{(R_e + R_f)} - V \quad (3)$$

Para melhor avaliar o comparador quando da inversão da saturação ao estado desativado, seu tempo de resposta (t_C) foi caracterizado pela soma de duas medidas parciais, tendo como início a ocorrência de I_{Lim} : o tempo que o comparador leva para começar a responder (t_{1c}) e o seu tempo de descida (t_{2c}). Para reduzir o erro na medida

de t_{1c} , será considerado que o início da resposta do comparador se dará quando sua saída atingir 90% de V_{Sat} .

A Figura 4 ilustra a caracterização para a medida do tempo de resposta do comparador.

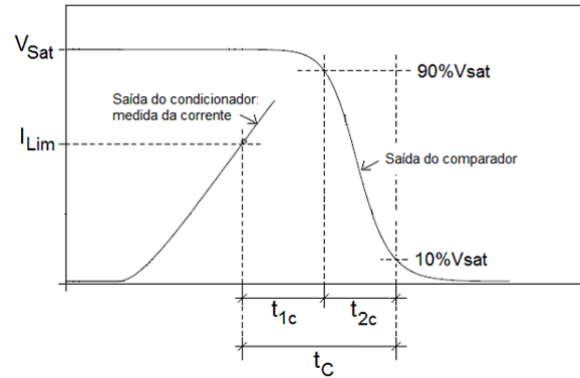


Figura 4: Caracterização do tempo de resposta do comparador.

2.3 Atuador

A etapa final do circuito de proteção refere-se ao atuador. Esse componente deve ser capaz de interromper a circulação da corrente na carga sob o comando da tensão de saída do comparador (V_{cmp}).

Para os ensaios experimentais foi definida a seguinte configuração: V_F igual a 12 V e dois valores de carga, 100 Ω e 5 Ω (em paralelo) para produzir correntes abaixo e acima da (I_{Lim} , ou seja, 120 mA e 2521 mA, respectivamente).

Nesse estágio, representado na Figura 5, foi utilizado um transistor de efeito de campo do tipo MOSFET de canal N, cuja tensão de gatilho (V_{GS}) foi extraída das especificações do componente. Em funcionamento normal, a tensão da fonte (V_F) é a tensão aplicada à carga. A tensão nos terminais do atuador (V_A) permitirá a caracterização do seu funcionamento, sendo igual a V_F após a interrupção da corrente na carga.

Para avaliar a reposta do atuador, o sinal de V_A foi considerado como uma resposta ao degrau de um circuito de 2ª ordem. Assim, o tempo de resposta do atuador (t_F) pôde ser caracterizado pela soma de 3 medidas parciais, tendo como início o instante em que a saída do comparador (V_{cmp}) atinge o valor mínimo para manter o atuador em funcionamento (V_{GS}): o tempo que o atuador leva para começar a responder (t_{1f}), seguido do seu tempo de subida (t_{2f}) e finalizado pelo tempo necessário para atingir a ruptura definitiva da corrente na carga (t_{3f}).

Para reduzir o erro na medida de t_{1f} , será considerado que o início da resposta do atuador se dará quando sua saída atingir 10 % de V_F . Adotou-se também que o término de t_{3f} ocorrerá

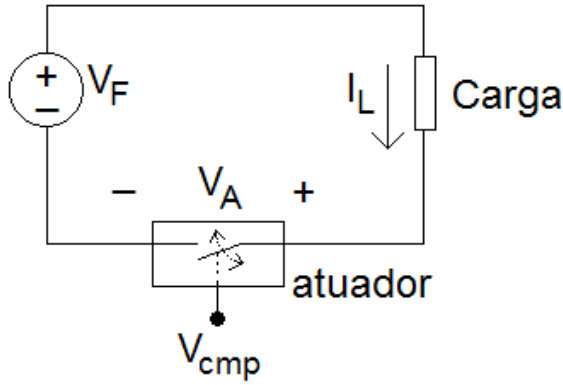


Figura 5: Diagrama da etapa do atuador, sob o comando de V_{cmp} . A tensão V_A caracteriza o comportamento do atuador.

quando a oscilação sobre V_A for inferior a 10 % de V_F .

A Figura 6 ilustra a caracterização para a medida do tempo de resposta do atuador.

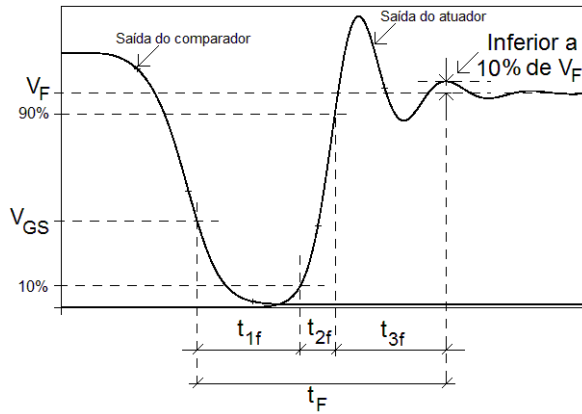


Figura 6: Caracterização do tempo de resposta do atuador.

3 Condições experimentais

Os ensaios de sobrecarga foram efetuados utilizando uma fonte tensão Minipa – modelo MPS-3503D e uma fonte de alimentação de uma estação de trabalho SUN – modelo APS-28. Dois osciloscópios Agilent 100MHz – modelo DSO-X2012A, foram utilizados em sincronismo para aquisição de até 4 sinais simultâneos. Ensaios iniciais foram efetuados para quantificar a diferença de fase em razão do sinal de sincronismo. Durante o processo de calibração e medidas, foi utilizado um gerador de sinais também da Agilent – modelo 33210A. Os ajustes de casamento de impedância das pontas de prova dos osciloscópios foram efetuados de modo a minimizar os erros de medidas.

Com a finalidade de investigar possíveis variações nos tempos de resposta dos estágios do circuito, ilustrado na Figura 1, foram utilizados diferentes componentes eletrônicos. Para cada um

deles, um parâmetro representativo de sua velocidade foi obtido conforme especificado na Tabela 1.

Tabela 1: Componentes ativos utilizados neste trabalho e um parâmetro indicativo do tempo de resposta (dados fornecidos pelos fabricantes).

Componente	Parâmetro	Valor	Unidade
Ampop TL074	<i>Slew rate</i>	13	(V/ μ S)
Ampop TL084	<i>Slew rate</i>	13	(V/ μ S)
Ampop LF356	<i>Slew rate</i>	12	(V/ μ S)
Comparador LM311	<i>Response time</i>	165	ns
MOSFET IRF540N	<i>Turn-off Delay Time</i>	96	ns
MOSFET IRF840N	<i>Turn-off Delay Time</i>	69	ns
MOSFET P5NK50Z	<i>Turn-off Delay Time</i>	47	ns

4 Resultados

As medidas dos tempos parciais, como descritas anteriormente, foram efetuadas para diferentes componentes. O resultado do primeiro estágio, ou seja, a aquisição e condicionamento pode ser verificado na Tabela 2. Observa-se que, para os componentes testados nessa etapa, o amplificador LF356 apresentou o menor tempo de resposta ($t_A = 195$ ns).

Tabela 2: Tempos de resposta de diferentes componentes na primeira etapa: aquisição e condicionamento do sinal de corrente.

Componente	t_{1a} (ns)	t_{2a} (ns)	t_A (ns)
TL074	370	1270	1640
TL084	75	190	265
TL084	55	140	165

A implementação do estágio do comparador foi realizada separadamente dos demais estágios. Optou-se por utilizar um circuito comparador dedicado, o LM311. O resultado dessa implementação está apresentado na Tabela 3, na qual nota-se que esse componente apresentou o tempo de resposta para $t_C = 155$ ns.

Tabela 3: Tempos de resposta da segunda etapa: comparador.

Componente	t_{1c} (ns)	t_{2c} (ns)	t_C (ns)
LM311	127	28	155

Por último, as medidas do terceiro estágio, feitas com três diferentes atuadores, estão apresentadas na Tabela 4. Dessa análise foi observado que o MOSFET P5NK50Z teve o menor tempo de atuação ($t_F = 352$ ns).

Tabela 4: Tempos de resposta de diferentes componentes na terceira etapa: atuador.

Componente	t_{1f} (ns)	t_{2f} (ns)	t_{3f} (ns)	t_F (ns)
IRF540	50	123	320	493
IRF840	150	170	209	535
P5NK50Z	52	70	230	352

Analisando individualmente cada estágio, pôde-se estimar que o circuito de proteção completo, na melhor configuração, levaria um tempo de resposta total de 702 ns.

Para verificar essa estimativa, o circuito completo foi implementado, considerando os componentes mais rápidos. A análise de resposta temporal desse circuito foi realizada submetendo o circuito à sobrecarga descrita anteriormente. Como resultado, obteve-se um tempo total de resposta de 820 ns. A Figura 7 ilustra os sinais de saída (I_L , V_{cmp} e V_A), permitindo a visualização do tempo de cada etapa (t_A , t_C e t_F).

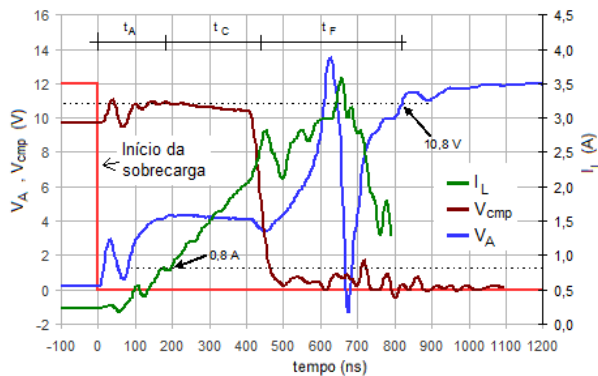


Figura 7: Sinais de saída (I_L , V_{cmp} e V_A) e o tempo (t_A , t_C e t_F) para cada etapa do circuito, quando submetido à sobrecarga. As tensões (V_{cmp} e V_A) utilizam a escala vertical do lado esquerdo e a corrente (I_L) utiliza a escala vertical do lado direito.

Como resultado final para a medida do tempo total de resposta, a Figura 8 ilustra o sinal de saída no atuador relacionada ao início da sobrecarga.

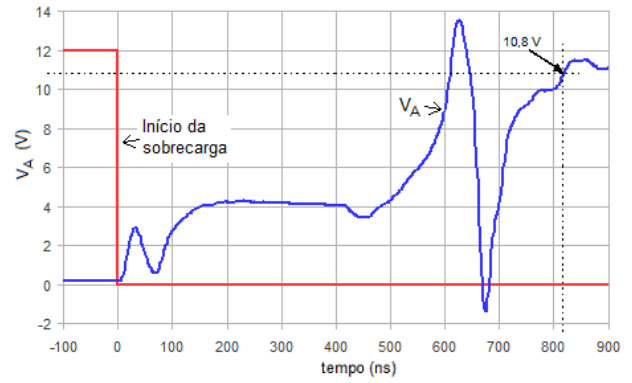


Figura 8: Sinal de saída no atuador (V_A), quando o circuito proposto é submetido à sobrecarga: tempo de resposta de 820ns.

5 Discussão

A medição dos tempos individuais e compartilhados permitiu identificar onde se localizam os pontos críticos no tempo de resposta do circuito. Com base nesses tempos é possível fazer uma escolha adequada dos componentes em função do desempenho/aplicação/custo/disponibilidade.

Para a aquisição e condicionamento do sinal de corrente, apesar de semelhantes valores de *slew rate* indicados na Tabela 1, observou-se que os amplificadores operacionais apresentaram desempenhos diferentes (Tabela 2). Esta constatação permite inferir que o *slew rate* pode não ser o parâmetro mais adequado como indicador para tempo de resposta.

Amplificadores operacionais também podem ser utilizados na configuração de comparador. Entretanto, por tratar-se de componente de múltiplas aplicações, o desempenho deles como comparador ficou comprometido (Tabela 3), tendo em vista que o tempo de resposta é um fator crítico. Por outro lado, a utilização de circuitos dedicados como comparador (LM311) apresentam melhor desempenho.

Para a etapa final, do atuador, descartou-se a utilização de relé por tratar-se de um componente de ação eletromecânica e, portanto, com alto tempo de resposta. Para obter respostas rápidas no atuador, transistores MOSFET foram utilizados (Tabela 1). Para esses componentes, as medidas efetuadas (Tabela 4) mostraram-se discordantes do parâmetro *turn-off delay time*, indicado no *datasheet*. Apesar do *turn-off delay time* fornecer uma boa indicação do tempo de resposta, não foi suficiente para permitir a indicação do MOSFET mais rápido entre IRF540 e IRF840. Além do tempo de resposta, um outro fator limitante para a escolha do atuador é a máxima corrente permitida.

O desempenho do circuito proposto ficou caracterizado pela soma dos valores estimados (702

ns) e pela medida efetiva (820 ns). A avaliação do resultado ilustrado na Figura 7 permite identificar a eventual etapa a ser melhorada. A Figura 8 resume o desempenho pela identificação do tempo total de resposta do circuito implementado.

6 Conclusão

Para avaliar o tempo de resposta de um circuito de proteção contra sobrecarga, a análise compartimentada apresentada neste trabalho permitiu identificar qual(is) etapa(s) apresenta(m) tempo(s) de resposta a ser(em) melhorado(s). A partir dessa análise, fica objetiva a escolha mais adequada dos componentes de acordo com suas funções, o que permitirá estabelecer a estimativa para o tempo de resposta do circuito.

Com base nos resultados obtidos com diversos componentes, foi implementado um circuito de proteção que resultou em um desempenho de ação "ultrarrápida", com tempo de resposta de 820 ns. Os resultados também mostram que a utilização de componentes discretos e de baixo custo oferece excelente desempenho quando comparado às demais pesquisas em busca de reduzidos tempos de resposta para proteção de sobrecarga (Yuasa et al. 2010; Jones et al. 2017; Wang et al. 2014).

Referências

BOGART, J.; F., T. *Aplicações de amplificadores operacionais. In Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, vol. II. 3ª ed.* [S.l.]: Makron Books, São Paulo-SP, 2001., 2001.

BUSSMANN, C. *Fast-acting Glass Tube Fuses: GMA Series. Datasheet 2p.* [S.l.]: EATON, Powering Business Worldwide, 2010.

CHIPGOAL. *Cg8010DX16 Datasheet, 3p.* [S.l.]: ChipGoal, Semiconductors, 2007.

DAVIS, S. *Voltage Regulator ICs: in Power Management Book Web Series. Power Electronics Library.* [S.l.]: Power Management, 2016.

JONES, E. A.; WILLIFORD, P.; WANG, F. A fast overcurrent protection scheme for gan gits. *2017 IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, Albuquerque, NM, p. 277–284, 2017.

KOJOVIC, L. A.; WITTE, J. F. A new method in reducing the overcurrent protection response times at high fault currents to protect equipment from extended stress. *Transmission and Distribution Conference and Exposition IEEE/PES.*, 2001.

MICREL, I. *MIC5013 Datasheet, 15p.* [S.l.]: Micrel, 2005.

NATIONAL INSTRUMENTS. *How to choose the right relay.* 2015. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/2774/en/>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

SILVA, C. A. et al. Um método para correção da tensão secundária de transformadores de potencial capacitivos: validação em tempo real. *IV Simpósio brasileiro de sistemas elétricos.*, 2012.

SLADE, P.; TAYLOR, E.; HASKINS, R. Effect of short circuit current duration on the welding of closed contacts in vacuum. *Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts.*, p. 69–74, 2005.

TEXAS, I. *BQ24315 Datasheet, 23p.* [S.l.]: Texas Instruments, 2008.

TEXAS, I. *LM317 Datasheet, 31p.* [S.l.]: Texas Instruments, 2014.

TUITE, D. *The Use And Misuse Of Circuit Protection Devices.* [s.n.], 2014. Disponível em: <<http://electronicdesign.com/site-files/electronicdesign.com/files/uploads/2014/01/TE-010814-Basics-online-v2.pdf>>

WANG, Z. et al. Design and performance evaluation of overcurrent protection schemes for silicon carbide (sic) power mosfets. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.*, v. 61, n. 10, p. 5570–5581, 2014.

YUASA, K.; NAKAMICHI, S.; OMURA, I. Ultra high speed short circuit protection for igt with gate charge sensing. *Proc. International Symposium on Power Semi-conductor Devices IC's (ISPSD).*, p. 37–40, 2010.