

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO UTILIZANDO DISJUNTOR RESIDUAL MONOFÁSICO CONTROLADO POR ARDUINO

EWERTON S. FARIAS, CECÍLIA M. COSTA, EMERSON L. SOARES, ADEMAR G. COSTA JUNIOR, GILVAN V. ANDRADE JUNIOR

*Laboratório de Instrumentação, Sistemas de Controle e Automação (LINSCA)
IFPB, campus João Pessoa, Brasil*

E-mails: {ewerton.farias.ee, ceciliamcost, emersonls}@gmail.com,
{ademar.costa, gilvan.andrade}@ifpb.edu.br

Abstract— This work shows the development of a residual circuit breaker (RCD) monophasic controlled by Arduino, integrating the functionality of a thermomagnetic circuit-breaker in an RCD. It was raised characteristic curve of operation of a magnetic heat of the B-type circuit breaker, through an experimental arrangement, and based on the obtained data, the parameterization and the implementation of the prototype based on inverse curves, used and applied in relay protection. Using the Arduino, a computational routine was implemented, where the electric current in a single-phase circuit is monitored by a Hall effect sensor, comparing it to the values described in the experimental curve of the chosen thermal magnetic circuit breaker, determining the exact time of operation the same.

Keywords— Arduino, trip curves, residual circuit breaker, thermal magnetic circuit breaker, Hall effect sensor.

Resumo— Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um disjuntor diferencial residual (DR) monofásico em uma plataforma de prototipagem eletrônica Arduino, integrando as funcionalidades de um disjuntor termomagnético em um DR. Por meio da curva característica de atuação de um disjuntor termomagnético do tipo B, em um arranjo experimental implementado, foi realizada a parametrização e a implementação do protótipo baseado nas curvas de tempo inverso, utilizadas e aplicadas em relés de proteção. Usando o Arduino, uma rotina computacional foi implementada, onde a corrente elétrica em um circuito monofásico é monitorada por meio de um sensor de efeito Hall, comparando-a com os valores descritos na curva experimental do disjuntor termomagnético escolhido, determinando o momento exato de atuação do mesmo.

Palavras-chave— Arduino, curvas de disparo, disjuntor diferencial residual, disjuntor termomagnético, sensor de efeito Hall.

1 Introdução

O uso da eletricidade, cada vez mais, está sendo fundamental ao desenvolvimento da sociedade. Contudo, um número elevado de acidentes com eletricidade tem impulsionado o desenvolvimento de métodos e de dispositivos que permitam o seu uso de forma segura e adequada.

As falhas nos sistemas elétricos são, geralmente, ocasionadas por sobrecarga, por curto circuito ou por correntes de fuga, termos utilizados para designar um fluxo indesejado de corrente, em um determinado circuito. Essas situações de sobrecargas indesejadas ocasionam danos aos sistemas como, por exemplo, a destruição de equipamentos, incêndios nas instalações, além de possíveis danos a vida humana.

Visando a proteção de equipamentos e da vida humana, normas técnicas foram desenvolvidas determinando a forma construtiva dos equipamentos de proteção, e os procedimentos para a utilização. A construção dos disjuntores residenciais possui uma norma técnica (ABNT NBR NM 60898, 2004), bem como os dispositivos diferenciais residuais (DR) que seguem outras duas (ABNT NBR NM 61009-1, 2005; IEC 61009-1, 2012). A forma como esses dispositivos devem ser instalados é regida pela norma técnica NBR 5410 (ABNT NBR 5410, 2004).

A automação desses dispositivos de proteção facilita o monitoramento e a manutenção, aumentando a segurança nas instalações elétricas. Em trabalhos recentes, Deshui *et al* (2011) apresentam uma im-

plementação de um disjuntor residual utilizando o microcontrolador PIC16C72A. Fang *et al* (2013) apresentaram um modelo de uma unidade de controle inteligente utilizando FPGA e DSP, destinada a proteção de circuitos de alta tensão. Lopes *et al* (2014) apresentam um protótipo de dispositivo diferencial residual (DR) eletrônico baseado na plataforma de prototipagem eletrônica Arduino Mega, utilizando transformador de corrente e *shields* de relés para atuação.

O objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento de um disjuntor diferencial residual automatizado, implementado na plataforma de prototipagem eletrônica Arduino Uno R3, baseada em um microcontrolador ATmega, com a utilização de um sensor de corrente de efeito Hall, integrando as funcionalidades de um disjuntor termomagnético em um DR, condicionando este a trabalhar com as características residuais e termomagnéticas.

Este artigo está dividido desse modo. Na Seção II é apresentada a fundamentação teórica básica utilizada no desenvolvimento do protótipo. Na Seção III é apresentado o *setup* experimental para caracterização do disjuntor termomagnético e a sua implementação no Arduino, também como função residual. Na Seção IV são apresentados os resultados obtidos com o protótipo desenvolvido e por fim, na Seção V, as considerações finais deste trabalho.

2 Fundamentação Teórica

Nesta seção são apresentados os principais conceitos necessários ao entendimento do projeto desenvolvido.

2.1 Disjuntor Termomagnético

O disjuntor é um dispositivo que possui como uma de suas funções, a proteção das instalações elétricas contra os efeitos de sobrecorrentes e de curtos circuitos, assegurando a proteção de cabos e de condutores que compõem uma rede de distribuição de energia elétrica. Existe um grande número de disjuntores com diversas características, utilizados nos mais variados níveis de tensão. Neste trabalho são utilizados disjuntores termomagnéticos para a proteção de instalações elétricas em baixa tensão, sendo sua atuação baseada ou nos efeitos térmicos, ou nos efeitos eletromagnéticos.

A atuação dos disparadores térmicos é normalmente caracterizada por um limiar bastante próximo da corrente nominal, ou de ajuste, permitindo detectar sobrecorrentes de pequena intensidade. Por sua vez, os disparadores eletromagnéticos atuam, em geral, em uma faixa de sobrecorrentes, cujo limite inferior é maior que as correntes de sobrecarga usuais, e o limite superior, igual à capacidade de interrupção do disjuntor (Cotrim, 2009). A Fig. 1 ilustra a estrutura interna de um disjuntor termomagnético.

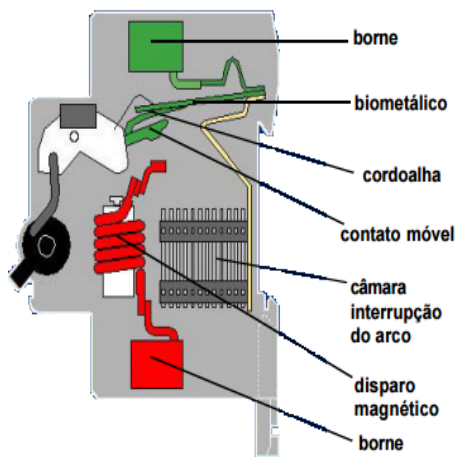


Figura 1. Estrutura interna de um disjuntor termomagnético.
Fonte: <http://migre.me/tpukz>

A forma de atuação de disjuntores, seja ela eletromagnética ou térmica, é regida por curvas específicas que se baseiam na relação entre a corrente e o tempo de disparo, em temperatura ambiente. Essas curvas podem ser do tipo B, C e D, de acordo com a natureza da aplicação, possuindo características distintas.

Os disjuntores de curva B, que foram utilizados nesse trabalho, são utilizados na proteção de circuitos que alimentam cargas com características predominantemente resistivas, como lâmpadas incandescentes, chuveiros, torneiras e aquecedores elétricos, além

dos circuitos de tomadas de uso geral. Os disparos neste tipo de disjuntor ocorrem entre três e cinco vezes o valor da corrente nominal do disjuntor (I_n). A curva do disjuntor termomagnético do tipo B é ilustrada na Fig. 2.

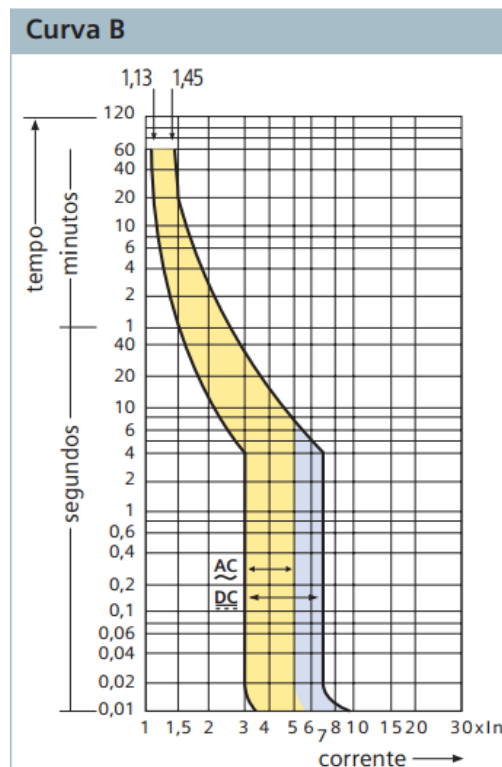


Figura 2. Curva de um disjuntor tipo B.
Fonte: <http://migre.me/tpujP>

2.2 Disjuntor de Corrente Diferencial Residual (DR)

Um disjuntor de corrente diferencial residual (dispositivo DR) é um dispositivo de proteção que detecta a diferença no fluxo de corrente em um determinado circuito. Essa diferença provoca a abertura do circuito, quando o valor da corrente diferencial ultrapassa um valor preestabelecido. Os dispositivos DR podem ser classificados em três tipos: AC, A e B. Essa classificação define o tipo de carga aplicada em cada disjuntor (Cotrim, 2009; Mamede Filho, 2010).

O dispositivo DR funciona baseado na lei de Kirchhoff das correntes, detectando a soma vetorial das correntes que percorrem os condutores vivos de um circuito, em determinado ponto do mesmo. Desse modo, a corrente diferencial residual (I_{DR}) no ponto considerado, provoca a interrupção do fluxo de corrente, de forma instantânea, quando a I_{DR} ultrapassa um valor preestabelecido, denominado de corrente diferencial residual nominal de atuação (I_{AN}) (Cotrim, 2009). A Fig. 3 ilustra o princípio de funcionamento do disjuntor DR.

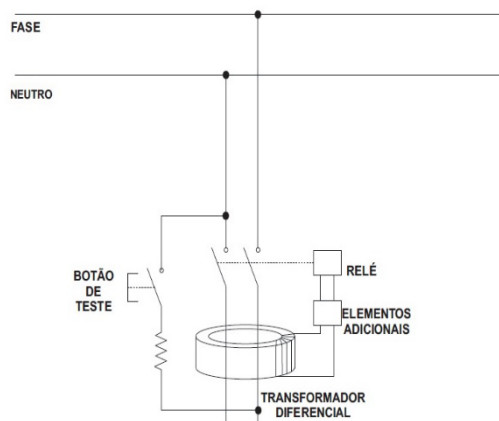


Figura 3. Funcionamento do disjuntor DR.

2.3 Sensor de Efeito Hall

O sensor de efeito Hall baseia-se no princípio do efeito Hall que depende da força de Lorenz interagindo com uma carga em movimento, por meio de um campo magnético. Quando um condutor é exposto a um campo magnético transversal, os elétrons em movimento são repelidos para uma das bordas. A concentração de elétrons nessa borda causa um campo elétrico transversal ao condutor e ao campo magnético (Balbinot e Brusamarello, 2011).

O campo elétrico transversal ao condutor causa uma diferença de potencial entre as duas bordas desse condutor, conhecida como tensão Hall. Essa tensão Hall varia com o tipo de condutor que é exposto ao campo magnético.

O sensor de efeito Hall utilizado no desenvolvimento do protótipo apresentado neste artigo é o ACS 712, que é um sensor de corrente elétrica, para o monitoramento desse parâmetro. O efeito Hall também é aplicado na ponta de corrente Tektronix A622 e no wattímetro digital Minipa ET 4091, utilizados também no desenvolvimento do protótipo.

3 Materiais e Métodos

Nesta seção são apresentados a bancada experimental e o material utilizado para tal. Para a realização do projeto foram utilizados os equipamentos ilustrados na Tabela 1.

3.1 Levantamento da Curva do Disjuntor Termomagnético

A primeira etapa do desenvolvimento do projeto foi verificar, na prática, o comportamento de um disjuntor termomagnético do tipo B, 6 A de corrente nominal, simultaneamente, com a caracterização de sua forma de atuação, comparando a curva teórica com a curva obtida durante os experimentos. A Fig. 4 ilustra o diagrama esquemático do *setup* experimental realizado. Primeiramente, foram instaladas resistências em paralelo com o objetivo de ter a menor

resistência possível com o objetivo de obter valores elevados de corrente elétrica.

Tabela 1. Material utilizado no *setup* experimental.

Item	Qtde.	Especificação
01	01	Osciloscópio Agilent DSO-X 2012A
02	01	Wattímetro digital ET-4091
03	01	Ponta de tensão Tektronix P5100A
04	01	Ponta de corrente Tektronix A622
05	01	Multímetro digital Agilent UA1233A
06	01	Autotransformador monofásico TDGC2J-10
07	06	Resistor de 120 Ω / 500 W
08	01	Banco resistivo de 900 Ω
09	08	Condutor de 2,5 mm ²
10	01	Arduino Uno R3
11	01	Sensor de corrente ACS712
12	01	Shield Rel�
13	01	Disjuntor termomagnético monofásico B6A
14	01	Disjuntor DR monofásico 25A
15	01	Termovisor Flir i7

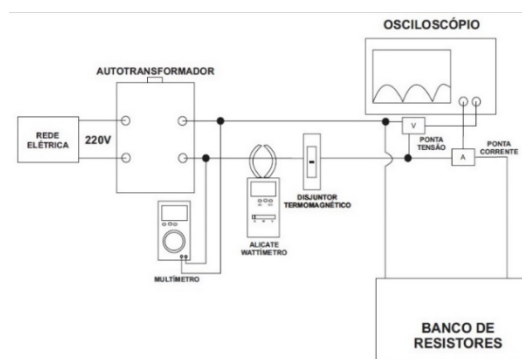


Figura 4. Diagrama esquemático do *setup* experimental da caracterização da curva do disjuntor termomagnético.

O disjuntor termomagnético foi conectado em série, entre a saída do autotransformador e do banco de resistências. Para o monitoramento das variáveis elétricas (tensões e correntes elétricas), um multímetro foi utilizado para a medição da tensão de saída no autotransformador, um alicate wattímetro para a corrente elétrica, juntamente com um osciloscópio responsável pelo armazenamento das leituras de corrente e de tensão elétrica. Após a realização das conexões entre o disjuntor, o banco de resistores, o autotransformador e os equipamentos de medição (osciloscópio, wattímetro, multímetro, ponta de tensão e corrente), foi verificada a temperatura do disjuntor. A Fig. 5 ilustra uma foto com o *setup* experimental a caracterização da curva do disjuntor.

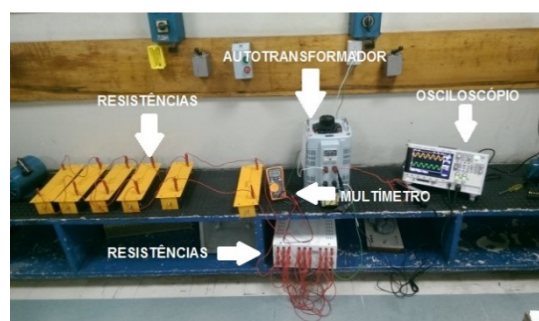


Figura 5. Fotografia do *setup* experimental de caracterização.

Para a caracterização do comportamento do disjuntor termomagnético, o mesmo foi submetido a testes de sobrecorrente, com o objetivo de verificar o nível de corrente no qual o disjuntor atuaria por disparo magnético. O disjuntor utilizado nos testes foi um disjuntor de 6 A, de curva característica tipo B, onde sua atuação magnética poderia ocorrer entre 18 e 30 A. O disparo magnético do dispositivo utilizado encontra-se acima de 22 A.

Encontrado o ponto de disparo magnético, o disjuntor foi sendo ajustado para que, em cada ciclo de desligamento, o valor da corrente a ser injetada fosse decrementado de 2 A, até chegar a corrente nominal do disjuntor. Em todas as medições foram coletados os dados das temperaturas iniciais, no momento da energização do circuito do disjuntor, e a temperatura final no momento da abertura dos contatos deste dispositivo.

Após esses ajustes foram realizadas cinco medições entre os valores de 26 A e 8 A. Com base nessas medições, obteve-se a curva característica do disjuntor tipo B de 6A, ilustrada na Fig. 6.

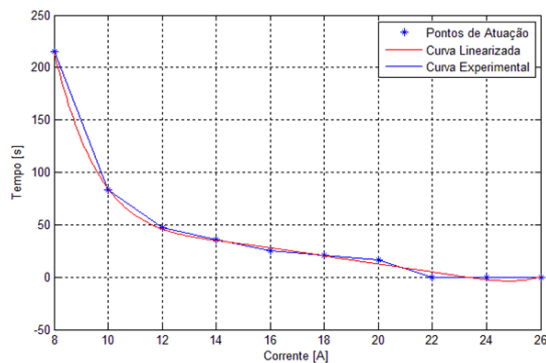


Figura 6. Curva experimental do disjuntor termomagnético examinado.

3.2 Arduino e o Sensor de Corrente

Após a caracterização do disjuntor termomagnético utilizado, foi realizada a etapa de parametrização do sensor de corrente ACS712, que permite medições para a corrente elétrica máxima de 30 A, utilizando a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino. O sensor utilizado permitiu que fosse obtido o valor RMS da corrente elétrica, por meio da Equação (2).

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}{N}} \quad (2)$$

nos quais: N é o número de amostras; e I são as amostras da corrente elétrica.

Obtido os valores de I_{RMS} , as funcionalidades de um disjuntor termomagnético de 6 A e a curva do tipo B foram implementadas em uma plataforma de prototipagem eletrônica Arduino Uno R3. A implementação foi realizada com base nas curvas aplicadas em relés de proteção contra sobrecorrente.

As curvas que determinam o período de atuação desses dispositivos podem ser do tipo padronizadas e não padronizadas. As curvas não padronizadas são definidas pelos fabricantes de cada dispositivo, e as padronizadas seguem equações determinadas pelos institutos *American National Standards Institute* (ANSI) ou *International Electrotechnical Commission* (IEC).

No trabalho desenvolvido adotou-se o padrão de curvas ANSI, para ajuste da proteção no DR. As curvas utilizadas foram as do tipo tempo extremamente inverso, que reproduzem a atuação dos disjuntores termomagnéticos. Com base nessas informações, a Equação (3), que rege o tempo de operação dos relés em relação à intensidade da corrente elétrica, foi utilizada para determinar o tempo de atuação do disjuntor residual controlado por Arduino, reproduzindo as funcionalidades de um disjuntor termomagnético.

A Equação (3) mencionada é dada por (IEEE Std. C37. 112, 1996):

$$T_{op} = TDS \times K_1 + \frac{K_2}{(M^{K_3} - 1)} \quad (3)$$

nos quais: T_{op} é o tempo de operação do relé; TDS é um fator multiplicativo para ajuste de tempo do relé; M é o múltiplo da corrente de ajuste; e K_1, K_2, K_3 são constantes definidas, de acordo com o tipo de curva.

As curvas que modelam os disjuntores são definidas pelas constantes K_N , que variam de acordo com o tipo de curva a ser utilizada. Todos os tipos de curvas estão representados na Tabela 2, definidas pelo padrão adotado pela ANSI.

Tabela 2. Constantes K_N para padrão ANSI.

Tipos de curva	K_1	K_2	K_3
Moderadamente inversa	0,0226	0,0104	0,0200
Inversa	0,1800	5,9500	2,0000
Muito inversa	0,0963	3,8800	2,0000
Extremamente inversa	0,0352	5,6700	2,0000
Inversa de curto tempo	0,0026	0,0034	0,0200

A partir dos dados obtidos nas medições do disjuntor termomagnético, a sua curva de atuação foi gerada, e utilizando a curva do tipo extremamente inversa, as constantes adotadas foram $K_1 = 0,0352$, $K_2 = 5,6700$ e $K_3 = 2,0000$, para o cálculo do tempo de abertura dos contatos do disjuntor.

3.3 Implementação do Disjuntor DR

Quando ocorre um surto nos disjuntores DR, uma corrente menor igual a 30 mA é gerada, alimentando uma bobina que aciona um mecanismo, provocando o desarme do disjuntor. Os parâmetros obtidos

com o Arduino possibilitaram condicionar o disjuntor DR a trabalhar com as características residuais e termomagnéticas.

O disjuntor DR possui um botão de teste, que ao ser acionado, realiza a abertura de seus contatos. Dessa forma, a implementação do sinal de controle advindo do Arduino é adaptada a esse botão de teste, para a interrupção automática do circuito.

Por meio de leituras de corrente do sensor ACS712, o Arduino determina se o circuito está em condições normais de funcionamento ou em sobrecarga. No caso de sobrecarga, o Arduino determina o tempo para abertura do disjuntor, enviando o comando de abertura ao relé, que em seguida, envia o sinal ao botão de teste, efetuando a abertura dos contatos do DR. A Fig. 7 ilustra o diagrama de blocos do funcionamento desse sistema.

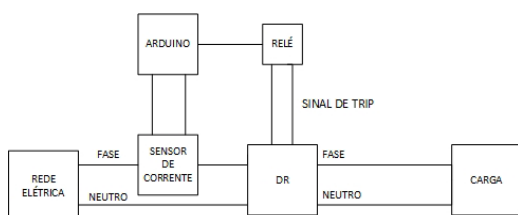


Figura 7. Diagrama de funcionamento do sistema.

4 Resultados

Com base em cinco medições realizadas para cada nível de sobrecorrente injetada no disjuntor termomagnético, foi realizado o tratamento estatístico dos dados, calculando o valor médio do tempo medido para cada valor de corrente, o desvio padrão (σ), além da aplicação do critério de Chauvenet para rejeição de *outliers*. Os dados dos valores médios das variáveis são indicados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores médios experimentais para curva do disjuntor termomagnético.

$I (A)$	$t (s)$	$\sigma (s)$
26,0	0,00	0,00
24,0	0,00	0,00
22,0	0,00	0,00
20,0	16,38	0,19
18,0	21,08	0,66
16,0	24,92	0,48
14,0	35,54	0,79
12,0	47,46	1,13
10,0	83,22	1,86
8,0	215,18	6,29

A partir dos dados obtidos nas medições do disjuntor termomagnético, e utilizando as constantes $TDS = 26$, $K_1 = 0,0352$, $K_2 = 5,6700$ e $K_3 = 2,0000$ obtidas da curva extremamente inversa do padrão ANSI, aplicou-se o valor das constantes mencionadas, na Equação (3). Dessa forma, a curva da

corrente elétrica em função do tempo, para o modelo do disjuntor termomagnético utilizado nos testes, é ilustrada na Fig. 8.

Utilizando o Arduino, foi implementada uma rotina computacional onde o usuário pode determinar três parâmetros: a corrente nominal do disjuntor; o Fator de Sobrecarga (FC), que determina o nível de corrente máximo suportado no circuito; e as constantes de acordo com a curva selecionada, que possibilitam determinar o tempo de abertura dos contatos do disjuntor.

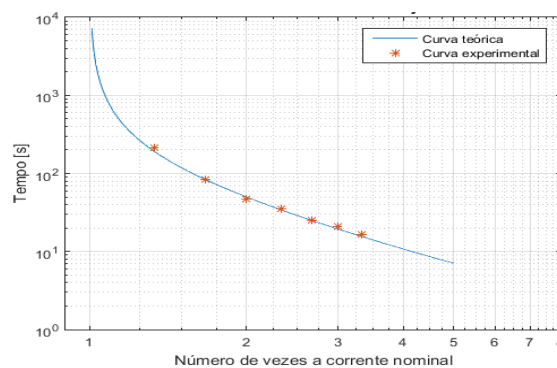


Figura 8. Curva de acionamento do disjuntor termomagnético.

Com base nos dados inseridos no Arduino, a partir dos ensaios realizados, a segunda etapa da rotina computacional é o monitoramento da corrente elétrica pelo sensor de corrente, onde o sistema microcontrolado analisa se o disjuntor está em sobrecarga ou em condições normais de operação.

Caso o disjuntor esteja em sobrecarga, a rotina computacional entra em sua terceira etapa, onde o Arduino pode atuar de forma instantânea, enviando o comando para a abertura do disjuntor DR, reproduzindo o disparo por efeito magnético, ou atuando em função do tempo, que reproduz o efeito térmico. O fluxograma da rotina computacional é ilustrado na Fig. 9.

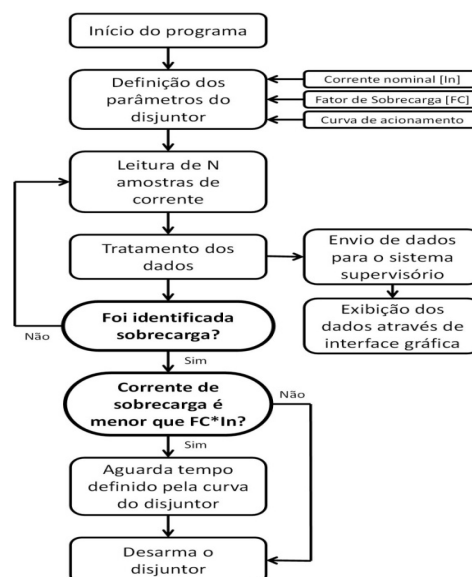


Figura 9. Fluxograma da rotina computacional implementada no Arduino.

Utilizando o protocolo de comunicação serial RS-232 (Serial USB) para enviar dados do Arduino a um sistema supervisor, contido em sua própria interface IDE (*Integrated Development Environment*), que exibe informações sobre a corrente medida, o tempo desde o início da sobrecarga e o tempo restante até o envio do comando para abertura do disjuntor DR. Um exemplo do monitoramento das leituras de corrente é ilustrado na Fig. 10.

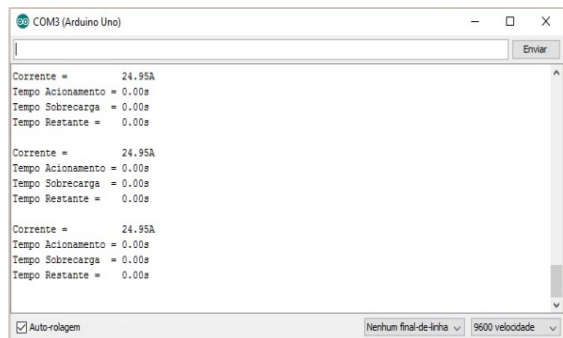


Figura 9. Interface gráfica de monitoramento.

5 Considerações Finais

O desenvolvimento do projeto apresentado neste artigo possibilitou integrar as funcionalidades de um disjuntor termomagnético em um disjuntor DR, destacando-se a modelagem da curva característica do tipo B de um disjuntor termomagnético utilizando um sistema microcontrolado, baseado na plataforma Arduino.

Optou-se por esta plataforma de prototipagem eletrônica, por se tratar de um dispositivo de custo acessível, viabilizando o projeto e reduzindo o tempo e os custos na elaboração do protótipo. Após a obtenção dos resultados é possível visualizar a substituição do Arduino, por um DSP (*Digital Signal Processor*) que possui velocidade de processamento superior, quando comparado ao Arduino, permitindo novas implementações de proteção mais avançadas.

Porém, existem algumas limitações que precisam ser aprimoradas que é o uso de sensores de corrente elétrica que possam realizar medições para correntes maiores do que verificadas neste trabalho. Também, aprimoramentos na medição da temperatura no contato bimetálico dos disjuntores precisam ser realizados, já que foi utilizado um termovisor que realizou medições de temperatura na região externa do corpo do disjuntor.

Dessa forma, será possível a realização da caracterização de outros tipos de curvas, além de disjuntores com valores maiores de corrente, integrando essa curva em um dispositivo eletrônico ajustável, de acordo com a seletividade do tipo de curva do disjuntor.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFPB campus João Pessoa pelo apoio financeiro dado.

Referências Bibliográficas

- ABNT NBR 5410 (2004). ABNT NBR 5410: 2004. Versão Corrigida: 2008. Instalações elétricas de baixa tensão. Norma técnica da ABNT, 2004.
- ABNT NBR NM 60898 (2004). ABNT NBR NM 60898:2004 – Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares. Norma técnica da ABNT, 2004.
- ABNT NBR NM 61009-1 (2005). ABNT NBR NM 61009-1:2005 – Interruptores a corrente diferencial-residual para usos domésticos e análogos sem dispositivo de proteção contra sobrecorrentes (RCCB). Norma técnica da ABNT, 2005.
- Balbinot, A. and Brusamarello, V. J. (2011). Instrumentação e Fundamentos de Medidas – Volume 2, 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC / Grupo Gen.
- Cotrim, A. A. M. B. (2009) Instalações elétricas, 5ª Edição. São Paulo: Pearson.
- Deshui, C. *et al.* (2011). Adaptive residual current circuit breaker based on microcontroller. In: Proc. 2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation.
- Fang, C. e. *et al.* (2013). Study of intelligent control device for circuit breaker controlled interrupting short circuit currents. In: TENCON 2013 – 2013 IEEE Region 10 Conference (31194), Xi'an (China), pp. 1-6.
- IEC 61009-1 Ed. 3.1 b (2012). Residual current operated circuit-breakers with integral overcurrent protection for household and similar uses (RCBOs) – Part 1: general rules. IEC Standard.
- IEEE Std. C37. 112 (1996). IEEE Standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays, IEEE, 1997.
- Lopes, D. U. M. *et al.* (2014). Dispositivo diferencial residual eletrônico com corrente de disparo reduzido para proteção contra danos pessoais. In: Anais do Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE 2014), Juiz de Fora (MG).
- Mamede Filho, J. (2010) Instalações elétricas Industriais, 8ª Edição. Rio de Janeiro: LTC/Grupo Gen, 2010.