

Banco de carga trifásico resistivo inteligente de 35kW de baixo custo

Daniel Miranda Esther * Daniel de Almeida Fernandes **
Manuel A. Rendón **

* *Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG,
(e-mail: daniel.miranda@engenharia.ufjf.br)*

** *Departamento de Energia Elétrica da UFJF,
(e-mails: daniel.fernandes@ufjf.edu.br; manuel.rendon@ufjf.edu.br)*

Abstract: In this paper, a three-phase, intelligent, and low-cost resistive load bank is proposed to equip the Hybrid-Electric Propulsion Laboratory of the UFJF. It works with 380V, 60Hz, line voltages, and serves as a load of up to 35kW, split into seven identical 5kW taps. The resistive elements are domestic appliance components made of nichrome. Air cooling is attained through forced convection. The (discrete-event) controller carries out an intelligent tap rotation scheme in order to extend the lifespan of the main components. The functioning of the load bank is maintained in the event of non-catastrophic faults by deactivating the malfunctioning tap(s) and putting (an)other tap(s) in operation to replace it(them).

Resumo: Propõe-se neste artigo um banco de carga resistivo trifásico, inteligente e de baixo custo, para equipar o Laboratório de Propulsão Híbrido-Elétrica (LAPHE) da UFJF. Ele trabalha com tensões de linha de 380V, 60Hz, e é capaz de aplicar uma carga de até 35kW, fracionada em sete derivações idênticas de 5kW. Os elementos resistivos são componentes de aquecimento de uso doméstico feitos de nicromo. O arrefecimento a ar é feito por convecção forçada. O controlador (eventos discretos) implementa um rodízio inteligente das derivações, a fim de dilatar a vida útil dos principais componentes. O funcionamento do banco é mantido em caso de faltas não catastróficas, desativando a(s) derivação(ões) defeituosa(s) e ativando outra(s) para substituí-la(s).

Keywords: Discrete-event control system; intelligent load; Petri nets; resistive load; three phase load bank.

Palavras-chave: Banco de carga trifásico; carga inteligente; carga resistiva; redes de Petri; sistema de controle a eventos discretos.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Um componente essencial em qualquer arranjo experimental dedicado à realização de pesquisas na área de energia é a carga, responsável por absorver a energia gerada. No caso da energia elétrica especificamente, as cargas podem apresentar características i) puramente resistiva, ii) indutiva ou iii) capacitiva, nesta ordem de importância (Simplex, 2020; Bearn, 2012). Tal componente está disponível comercialmente a preços da ordem de dezenas a centenas de milhares de reais, dependendo das suas características.

A Faculdade de Engenharia da UFJF está ampliando sua infraestrutura e passará a contar em breve com o Laboratório de Propulsão Híbrido-Elétrica (LAPHE). A obra de construção civil já foi concluída, restando apenas equipá-lo. Entre os equipamentos necessários é previsto um banco de carga 3Ø resistivo equilibrado de 35kW com derivações que permitem aplicar valores parciais de carga.

Este artigo propõe uma alternativa, economicamente mais viável do que as disponíveis no mercado atualmente, para a implementação de um banco de carga com as característi-

cas técnicas e construtivas desejáveis para atender ao laboratório mencionado. Um sistema de controle a eventos discretos (Cassandras & Lafortune, 2008; Hruz & Zhou, 2007) ativa e desativa as derivações através de um esquema de rodízio inteligente, de modo que todas as derivações operem durante tempos equivalentes para dilatar a vida útil dos principais componentes elétricos.

O restante do artigo está assim organizado: a Seção 2 apresenta o circuito elétrico do banco de carga; a Seção 3 apresenta o controlador a eventos discretos que gerencia a ativação das derivações; a Seção 4 apresenta e discute resultados simulados; a Seção 5, por fim, apresenta conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é propor um banco de carga 3Ø resistivo equilibrado, inteligente, robusto e de baixo custo. Ele trabalha com tensões de linha de 380V, 60Hz, absorve até 35kW e possui 7 derivações (*taps*) de 5kW idênticas.

1.3 Revisão bibliográfica

Bancos de carga são dispositivos que aplicam carga a uma fonte de energia, simulando a carga que ela alimentaria

em sua operação real. São utilizados para testar sistemas geradores como sistemas do tipo *Uninterruptible Power Supply* (UPS), inversores de frequência, baterias, geradores movidos por motores de combustão interna, geradores de potência para aeronaves, entre muitos outros (Simplex, 2020). Para sistemas de *backup* como UPSs, testes de desempenho são tipicamente conduzidos regularmente para assegurar o correto funcionamento do gerador quando solicitado (Worldwide Power Products, 2020; Bearn, 2012).

Quanto à sua natureza elétrica, bancos de carga podem ser subdivididos em resistivos, reativos ou mistos resistivos/reativos (Simplex, 2020; Worldwide Power Products, 2020). No entanto, bancos resistivos são os mais comuns, seguidos dos indutivos e, por último, dos capacitivos (Bearn, 2012). De acordo com Oliveira (2018), dentre os bancos que fazem uso de elementos resistivos, são comuns esquemas de comutação em série e paralelo. Além disso, o autor afirma que cargas eletrônicas controláveis podem ser configuradas para modos de operação de corrente, tensão, resistência ou potência constante. Neste trabalho, interessa o uso de uma carga passiva que opere com resistência elétrica constante, demandando a potência prevista quando submetida à tensão nominal de trabalho.

Itens de segurança comumente encontrados em bancos de carga incluem proteções contra curto-circuito, sobretensão, superaquecimento e falha no arrefecimento (Simplex, 2020). No tocante ao sistema de arrefecimento, convecção natural pode ser utilizada com cargas de até 20kW (Simplex, 2020). No entanto, as soluções mais comuns são i) sistemas de ventilação forçada, ii) arrefecimento a água e iii) utilização direta do fluxo de ar vindo do radiador do gerador elétrico. Considerando que o arrefecimento a ar pode ser utilizado mesmo em sistemas da ordem de centenas de quilowatts (Eagle Eye Power Solutions, 2020; ASCO Power Technologies, 2019), e também que sistemas a água envolvendo bombeamento elevariam tanto a complexidade quanto o custo do banco de carga, especialmente para um módulo portátil, para os fins deste trabalho, foi feita a opção pelo método de arrefecimento a ar.

2. CIRCUITO ELÉTRICO

2.1 Introdução

Propõe-se no presente trabalho um banco de carga resistivo microcontrolado para uso acadêmico, com o mais baixo custo possível, conquanto ainda atenda aos requisitos de confiabilidade, vida útil e segurança. Sua função é fornecer uma carga estável e escalonada para testes de sistemas geradores. Dada a natureza resistiva pura da carga, faz-se claro que a escolha dos elementos resistivos é uma questão central, que influencia todas as outras decisões do projeto.

Os resistores de alta potência tipicamente encontrados no mercado para aplicações industriais, por exemplo, testes de geradores, partida ou frenagem de motores, etc., embora tenham características desejáveis em termos de confiabilidade e durabilidade, frequentemente apresentam elevado custo. Em contraposição, resistores de aquecimento destinados à utilização doméstica tipicamente não são projetados para trabalhar em regime contínuo por muitas horas; no entanto, são muito mais viáveis economicamente.

Neste projeto, a presença dos múltiplos elementos resistivos que compõem as derivações trifásicas torna o emprego de resistores industriais proibitivo do ponto de vista econômico. Além disto, é desejável que os valores de resistência sejam o mais estáveis possível, de maneira a não comprometer os resultados de testes do sistema gerador. Portanto, propõe-se o uso de resistores encontrados em eletrodomésticos, especificamente aqueles utilizados em secadores de cabelo destinados a uso profissional, o que se justifica por i) seu custo relativamente baixo e facilidade de obtenção no mercado nacional e ii) sua construção com fios de ligas metálicas de elevada estabilidade térmica, como a de Níquel-Cromo (NiCr), também chamada de nicromo.

De maneira a maximizar a vida útil das resistências elétricas, são aplicadas algumas técnicas como i) emprego dos elementos para dissipar somente uma fração da sua potência nominal, ii) rodízio das derivações quando o banco de carga opera com cargas parciais e iii) ventilação forçada com fluxo de ar igual ou superior ao utilizado em sua operação normal no interior do eletrodoméstico.

2.2 Circuito elétrico

O circuito elétrico do banco é mostrado como um diagrama unifilar na Figura 1. Há um Disjuntor geral (D). Todas as derivações são protegidas individualmente por Interruptores Diferenciais Residuais (IDRs). Elas são comutadas através de Relés de Estado Sólido (RESS) para maior confiabilidade e longevidade de operação. Um controlador (detalhado na Seção 3) comuta as derivações através de um esquema de rodízio, de modo que todas as resistências elétricas e relés trabalhem por tempos equivalentes. Busca-se evitar o desgaste prematuro dos componentes. As correntes das derivações são medidas por Sensores de Corrente (SCs). As temperaturas nas derivações são medidas por Sensores de Temperatura (STs). As tensões de linha da alimentação elétrica são medidas por Sensores de Tensão (SVs). As resistências das derivações têm valores nominais de 127V e 1700W, e são associadas em estrela. Cada ramo da estrela é composto por três resistências associadas em série, de modo que cada resistência é submetida a uma tensão de 73,33V, o que corresponde a uma potência dissipada de 566,67W por resistência, ou seja, 33% da potência máxima nominal que ela poderia dissipar. Alguns componentes foram omitidos no diagrama com o intuito de simplificá-lo um pouco; são eles o controlador, as ventoinhas que arrefecem os conjuntos de resistências e uma fonte de alimentação CC. Os componentes são especificados na Subseção 2.4. Por fim, o diagrama indica que uma parte do circuito é montada dentro de um quadro de comando elétrico, enquanto outra parte tem que ser montada fora dele, pois trabalha sob temperaturas altas e carece de arrefecimento.

2.3 Proteções

O disjuntor geral (ver Figura 1) protege todo o circuito do banco de carga contra sobrecargas e ainda permite que ele seja desconectado do gerador quando necessário.

Para o banco de carga operar com segurança é importante que as três tensões de linha sejam virtualmente idênticas. Logo, torna-se necessário medi-las e, para isto, foi desenvolvido o circuito cujo esquema eletrônico é mostrado na Figura 2. Sua saída produz nominalmente cerca de $1,4V_{ef}$

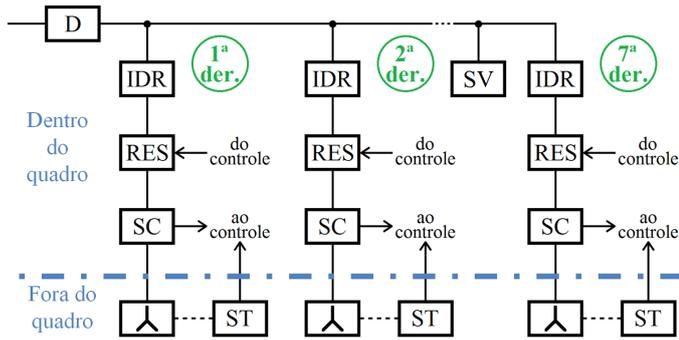


Figura 1. Diagrama unifilar do circuito elétrico do banco de carga. (Legenda: D = Disjuntor; IDR = Interruptor Diferencial Residual; RES = Relé de Estado Sólido; SC = Sensor de Corrente; Y = Carga 3φ resistiva da derivação (associação estrela); ST = Sensor de Temperatura; e SV = Sensor de Tensão)

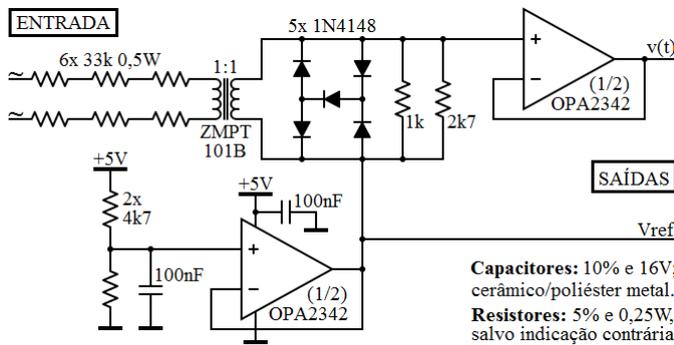


Figura 2. Circuito de sensoriamento de tensão elétrica.

para a entrada de $380V_{ef}$, somada ao deslocamento de nível CC (*offset*) $V_{ref} \approx 2,5V$, ou seja, $v(t) \in \mathbb{R} | v(t) \in [1,1; 3,9]$ [V]. Esta saída pode ser lida por um conversor A/D. O transformador ZMPT101B apresenta tensão de isolamento de 3kV. O circuito ceifador paralelo impede que a tensão no secundário do transformador ultrapasse cerca de $2,2V_p$. O circuito apresentado permite medir apenas uma tensão; para medir as três, basta replicar somente a metade superior dele, enquanto o circuito gerador da tensão de referência V_{ref} serve aos três canais. Neste caso, pode-se trabalhar ou com dois Circuitos Integrados (CIs) OPA2342 (duplo Amplificador Operacional (Amp. Op.)) ou com o CI OPA4342 (quádruplo Amp. Op.). Informações detalhadas sobre estes conceitos de eletrônica podem ser encontradas, por exemplo, em Boylestad & Nashelsky (2013) e Sedra & Smith (2007).

As três correntes de fase de uma derivação podem ser consideradas virtualmente idênticas, graças à presença de um IDR (ver Figura 1). Portanto, não se faz necessário medir cada corrente, mas apenas uma delas. O sensor de corrente especificado para desempenhar esta função é construído com base no CI ACS712-20A, cujo princípio de funcionamento é o efeito Hall. Sua tensão de isolamento ultrapassa 2kV. Ele mede correntes alternadas de até 20A e sua resposta é linear e compensada termicamente, tornando simples a tarefa de leitura do valor de corrente elétrica.

A temperatura de trabalho das resistências é um fator crítico da operação do banco de carga e deve ser monitorada constantemente. As razões para isto são i) a segurança delas próprias e dos demais componentes e condutores elétricos localizados em suas proximidades e ii) a estabilidade da

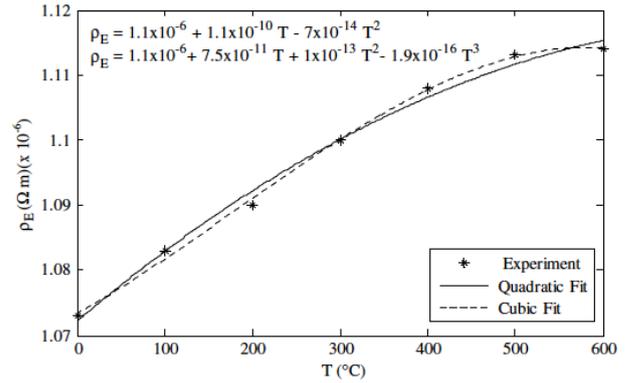


Figura 3. Resistividade do nicromo em função da temperatura. Fonte: Powell (1936).

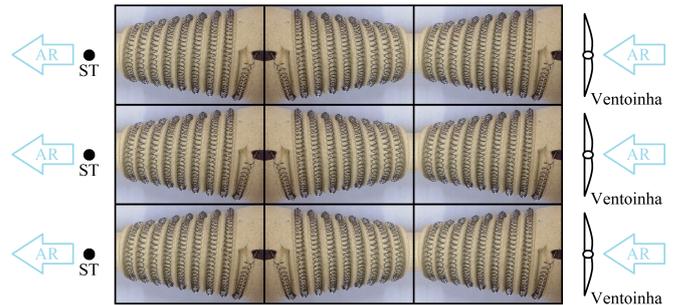


Figura 4. Arranjo construtivo de uma der. visto por cima.

carga, pois variações térmicas significativas podem acarretar variações igualmente significativas das resistências elétricas. Ligas utilizadas para aquecimento em geral apresentam boa estabilidade de sua resistividade em função da temperatura (Callister Jr. & Rethwisch, 2016; Schmidt, 2010). A fim de minimizar a variação de resistência, além da ventilação forçada, propõe-se o uso de resistências de nicromo. A título de exemplo, a Figura 3 revela uma variação de menos de 3% no valor da resistividade do nicromo trabalhando sob temperaturas entre $0^\circ C$ a $300^\circ C$.

O conjunto de resistências de uma derivação é arrefecido a ar através de um conjunto de 3 ventoinhas, como mostra a Figura 4. A vazão nominal de cada ventoinha é de cerca de $0,0425m^3/s$. Assumindo uma temperatura ambiente igual a $25^\circ C$, para que o ar saia do duto a uma temperatura em torno de $65^\circ C$, de maneira a manter as resistências em um regime térmico próximo àquele desenvolvido no interior de um secador de cabelo em funcionamento, obtém-se que a vazão total de ar através do duto de cada derivação deve ser de $0,1239m^3/s$. A equação

$$\Delta T = T_{int} - T_{ext} = \frac{c_h P_{elet}}{3600 Q_{ar}} \quad (1)$$

descreve a diferença de temperatura ΔT entre o ar ambiente ($T_{ext} = 25^\circ C$) e a porção mais quente do ar no interior do duto ($T_{int} \approx 65^\circ C$) em função da vazão de ar Q_{ar} [m^3/s] e da potência elétrica P_{elet} [W], onde c_h é um fator relativo à altitude que, no caso do referido laboratório, o qual encontra-se elevado a mais de 900m em relação ao nível do mar, vale $3,5 m^3 \cdot K/s \cdot W$ (Coolingzone, 2005).

O sensor selecionado para medir a temperatura do ar na saída do duto é o CI LM35, devido ao seu baixo custo e à saída (tensão) linear. Ele mede temperaturas entre $-55^\circ C$ e $150^\circ C$ com erro inferior a 1,5%.

Tabela 1. Lista de componentes e preços.

Componente	Preço*	Qtd.
Cabo flexível 2,5mm ²	0,70	100 m
Cabo flexível 16mm ²	7,00	100 m
Chapa metálica 2mm	350,00	2,8 m ²
Componentes eletrônicos diversos	23,00	1 cj
Disjuntor termomag. tripolar 63A curva B	87,00	1 pç
Fonte de alimentação chaveada 12V 10A	50,00	1 pç
IDR tetrapolar 25A 30mA	165,00	7 pçs
Microcontrolador Arduino Mega 2560	110,00	1 pç
Módulo multiplexador CD74HC4067	15,00	1 pç
Quadro de comando	100,00	1 pç
RES tripolar 25A	180,00	7 pçs
RES unipolar 2A	20,00	7 pçs
Resistência elétrica 127V 1700W (NiCr)	40,00	63 pçs
Sensor de corrente ACS712-20A	25,00	7 pçs
Sensor de temperatura LM35	10,00	21 pçs
Transformador ZMBT101B	10,00	3 pçs
Ventoinha 12V 0,5A 0,0425m ³ /s	75,00	21 pçs

*Preço médio por unidade dado em R\$.

2.4 Custo estimado

A Tabela 1 apresenta os preços médios dos principais componentes da carga, apreçados no mercado local. O custo total é estimado em R\$ 9.200,00.

3. CONTROLADOR

3.1 Introdução

O controlador a eventos discretos ativa e desativa as derivações D_i , $i \in \{1, 2, \dots, 7\}$, através de um esquema de rodízio inteligente, i) tanto quando o controlador recebe uma mensagem do sistema gerador solicitando uma variação da carga aplicada ii) quanto quando ocorrem faltas no circuito elétrico do banco de carga que não o impossibilitam de continuar aplicando carga parcial. No segundo caso, o controlador envia ao sistema gerador uma mensagem informando sua disponibilidade apenas parcial.

O tempo total de ativação da derivação D_i é acumulado pelo respectivo cronômetro T_i [s].

A Figura 5 mostra uma rede de Petri que descreve a lógica de funcionamento da derivação D_i e do cronômetro T_i associado a ela. A sub-rede retangular — excluídos o lugar e a transição localizados no topo da rede — é i) livre de impasses (*deadlocks*), ii) reversível e iii) segura e estritamente conservativa (David & Alla, 2010; Hruz & Zhou, 2007), propriedades estruturais e comportamentais bastante desejáveis e que indicam que a lógica proposta pode ser implementada em um controlador digital com sucesso. A sub-rede restante é temporizada determinística de disparo atômico, isto é, transcorrido o tempo associado à transição, a marca é transferida sem lapso de tempo do lugar de entrada da transição para ambos os lugares de saída. A política de disparo é por reamostragem, ou seja, a contagem de tempo é reiniciada a cada disparo desta transição (David & Alla, 2010; Hruz & Zhou, 2007). Esta sub-rede é utilizada para implementar o cronômetro T_i , daí seu único lugar ser não limitado.

3.2 Operação

Quando o controlador recebe uma solicitação de aplicação de um valor parcial de carga, ou seja, $P_{\text{carga}} < 35\text{kW}$, são

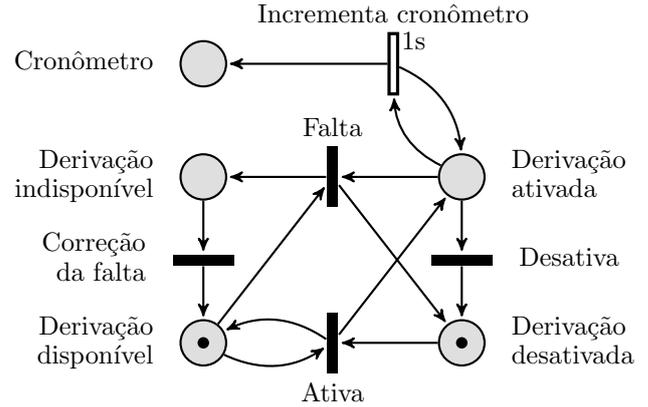


Figura 5. Rede de Petri que descreve a lógica de funcionamento da i -ésima derivação e do i -ésimo cronômetro.

postas em operação as derivações que foram ativadas durante menos tempo até então. Seus cronômetros associados começam a incrementar a contagem a partir dos valores congelados desde quando elas foram desativadas. Ver Figura 5. A mesma coisa ocorre quando o controlador recebe uma solicitação de aumento da carga aplicada.

Quando o controlador recebe uma solicitação de redução da carga aplicada, são desativadas as derivações que foram ativadas durante mais tempo até então, e as contagens dos cronômetros associados a elas são congeladas.

Em condições normais de operação, não ocorrem trocas de derivações, ou seja, o controlador não ativa uma derivação enquanto desativa outra, pois a comutação geraria distúrbios inesperados pelo sistema gerador. Todavia, na condição de falta não catastrófica, isto é, enquanto ainda é possível ao banco de carga aplicar cargas parciais, o controlador aplica o rodízio inteligente para isolar a(s) derivação(ões) que apresenta(m) falta(s) e substituí-la(s) por outra(s). Pode ser impossível recompor a carga solicitada nesta condição singular. Por conseguinte, o controlador envia ao sistema gerador uma mensagem informando tal condição.

3.3 Faltas

As faltas têm várias origens possíveis e são detectadas pelo controlador através das medições efetuadas pelos SCs, STs e SVs. Ver Figura 1. Evidentemente uma falta pode levar às outras. São elas:

- I. Correntes de fase diferentes:** o único SC de uma derivação (ver Subseção 2.3) indica a ausência de correntes enquanto ela está ativada. Isto ocorre devido à atuação do IDR no caso de faltas elétricas importantes. Esta situação não pode ser revertida automaticamente, pois o IDR necessita da intervenção humana para ser religado.
- II. Superaquecimento na derivação:** os STs indicam o superaquecimento de algum(ns) componente(s) da derivação, mais provavelmente de alguma(s) resistência(s). Isto pode ocorrer mesmo que a alimentação elétrica seja simétrica; por exemplo, pode ocorrer uma falha no arrefecimento da derivação. Ver Figura 4. Tal situação não deve ser revertida automaticamente por uma questão de segurança, ou seja, para evitar possíveis avarias no banco de carga. Assim que a falta for corrigida, o

código do controlador deve ser atualizado, ou seja, a indicação de falta deve ser anulada através de edição e recarga do código no controlador, mas sem modificar os valores acumulados pelos cronômetros.

III. Tensões de linha diferentes: os SVs indicam alimentação elétrica com assimetria importante. Esta condição se reflete nas correntes de fase das derivações, mas, como os IDRs não atuam neste caso, algumas resistências tendem a aquecer mais, enquanto outras tendem a aquecer menos do que o esperado.

3.4 Implementação

O Algoritmo 1 sintetiza a lógica de funcionamento do controlador, onde n_f representa a quantidade de derivações que apresentam faltas e N^+ e N^- representam respectivamente as quantidades de derivações atual e anterior.

Algoritmo 1 — Lógica de funcionamento do controlador

```

1: enquanto verdadeiro faça
2:   Lê entradas, processa dados e detecta faltas
3:   se faltas detectadas então           ▷ FALTA(S)
4:     Desativa as  $n_f$  der. que apresentam faltas
5:     Altera o estado das  $n_f$  der. para indisponível
6:   fim do se
7:   se mensagem do sistema gerador recebida então
8:     Computa  $N^+ := P_{\text{carga}} / 5$  e  $n := |N^+ - N^-|$ 
9:     se  $N^+ > N^-$  então                 ▷ ELEVA  $P_{\text{carga}}$ 
10:    se há  $n$  derivações disp. e desativadas então
11:      Ativa as  $n$  der. menos ativadas dentre
12:      aquelas que estão disp. e desativadas
13:    senão
14:      Ativa todas as der. ainda disponíveis
15:      Envia mensagem ao sistema gerador
16:    fim do se
17:    senão                               ▷ REDUZ  $P_{\text{carga}}$ 
18:      Desativa as  $n$  der. mais ativadas dentre
19:      aquelas que estão ativadas
20:    fim do se
21:     $N^- := N^+$ 
22:  fim do se
23:  se  $n_f > 0$  &  $N^- > 0$  então           ▷ SUBST. DER.
24:    se há  $n_f$  derivações disp. e desativadas então
25:      Ativa as  $n_f$  der. menos ativadas dentre
26:      aquelas que estão disp. e desativadas
27:    senão
28:      Ativa todas as der. ainda disponíveis
29:      Envia mensagem ao sistema gerador
30:    fim do se
31:  fim do enquanto

```

Diversas medições são necessárias para a operação segura e satisfatória do banco de carga, sendo três temperaturas e uma corrente por derivação, além das três tensões de linha, o que totaliza 31 sinais analógicos a serem lidos pelo controlador. Em termos de saídas, é necessário um sinal binário para cada RES que aciona uma derivação e suas respectivas ventoinhas, o que totaliza 14 sinais binários a serem gerados pelo controlador.

Tendo em vista as considerações acima, o controlador selecionado foi um Arduino Mega 2560, que dispõe de 54 pinos de E/S (I/O) digitais e 16 entradas analógicas dotadas de

conversores A/D de 10 bits de resolução. O controlador é baseado no microcontrolador de 8 bits ATmega2560, que possui 4kB de EEPROM, espaço de memória suficiente para registrar o tempo total de ativação de cada derivação. A quantidade de entradas analógicas é aumentada através do uso do módulo multiplexador CD74HC4067.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Introdução

A fim de ilustrar o funcionamento do rodízio inteligente, apresenta-se exemplos de operação do banco de carga.

4.2 Condição normal de operação ($n_f = 0$)

Exemplo 1. Seja o histórico de ativação das derivações mostrado na Figura 6. Estando todas desativadas, se o sistema gerador solicita a aplicação da carga $P_{\text{carga}} = 15\text{kW}$, então $N^- = 0$, $N^+ = 3$ e o controlador ativa as $n = 3$ derivações menos ativadas até o momento, ou seja, D_1 , D_4 e D_7 . Ver Linha 11 do Algoritmo 1. Ver Figura 6.

Exemplo 2. Em uma posterior solicitação de redução da carga aplicada para $P_{\text{carga}} = 10\text{kW}$, $N^- = 3$, $N^+ = 2$ e o controlador desativa $n = 1$ derivação, neste caso D_1 , pois $T_1 > T_4 > T_7$. Ver Linha 17 do Algoritmo 1. Ver Figura 6.

4.3 Condição anormal de operação ($n_f \neq 0$)

Exemplo 3. Seja a mesma situação inicial descrita na Subseção 4.2, tal que $P_{\text{carga}} = 15\text{kW}$. Estando as mesmas derivações ativadas, após 8h de operação do banco de carga é detectada falha no arrefecimento de D_7 . Então $n_f = 1$ e o controlador i) desativa D_7 , ii) altera seu estado para indisponível (ver Figura 5 e Linhas 4–5 do Algoritmo 1), como ilustra a Figura 7, e iii) busca dentre as derivações disponíveis ainda desativadas aquela com o menor tempo total de ativação para substituí-la (ver Linha 23 do Algoritmo 1). O procedimento termina com a ativação da derivação D_2 , como ilustra a Figura 8.

Exemplo 4. Considere mais 4h de operação sob a mesma condição anterior, seguida pelo encerramento da operação do banco de carga. Em um momento posterior, se o sistema gerador solicita a aplicação da carga $P_{\text{carga}} = 10\text{kW}$, então $N^- = 0$, $N^+ = 2$ e o controlador deve ativar $n = 2$ derivações. Com base nos tempos totais de ativação exibidos na Figura 9, a ordem de ativação é D_7 , D_4 , D_5 , D_2 , D_3 , D_1 e D_6 . No entanto, como o estado de D_7 é indisponível, e assim $n_f = 1$, são ativadas D_4 e D_5 . Ver Figura 9. Caso nesta condição fosse solicitada a aplicação da carga máxima, o controlador i) aplicaria a carga $P_{\text{carga}} = 30\text{kW}$ e ii) enviaria uma mensagem ao sistema gerador informando a impossibilidade de atender a solicitação recebida. Ver Linhas 13–14 do Algoritmo 1.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um banco de carga para atender as necessidades do novo laboratório da UFJF, estudando a possibilidade de utilizar elementos resistivos de eletrodomésticos, implementando estratégias visando assegurar a segurança e vida útil do banco, através de um esquema de

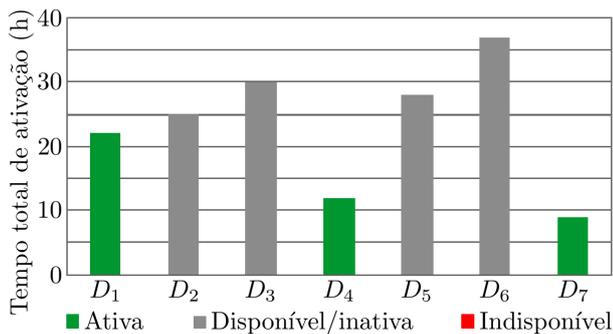


Figura 6. Ativação das derivações para $P_{\text{carga}} = 15\text{kW}$ sob condição normal de operação.

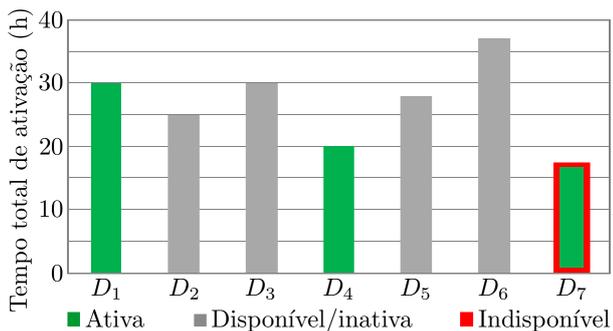


Figura 7. Detecção de uma falta não catastrófica e troca de derivações para $P_{\text{carga}} = 15\text{kW}$ — situação inicial.

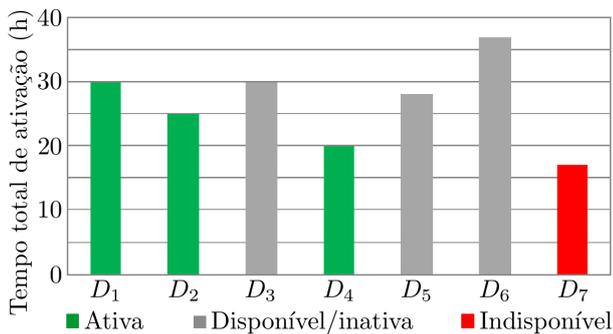


Figura 8. Detecção de uma falta não catastrófica e troca de derivações para $P_{\text{carga}} = 15\text{kW}$ — situação final.

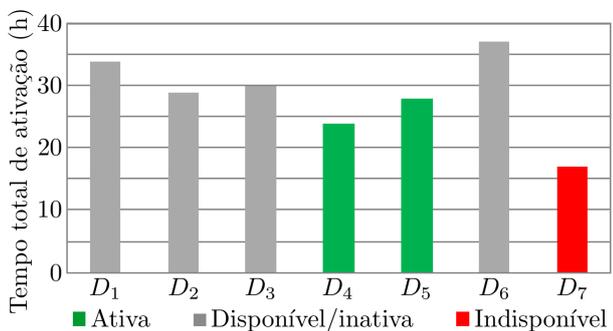


Figura 9. Ativação das derivações para $P_{\text{carga}} = 10\text{kW}$ sob condição de falta na derivação D_7 .

rodízio inteligente das derivações. Pôde-se concluir que é viável implementá-lo e com custo inferior a R\$ 10.000,00.

Devido às restrições de circulação do presente momento, dada a pandemia de Covid-19, não foi possível montar os protótipos requeridos para validar o banco de carga pro-

posto. Há muitos caminhos que podem e devem ser investigados ainda. Ficam como sugestões para trabalhos futuros i) a investigação da viabilidade de confecção das resistências e ii) a análise aprofundada dos mecanismos de arrefecimento das derivações.

REFERÊNCIAS

- ASCO Power Technologies (2019). Asco 9800 load bank. **Schneider Electric**. URL https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Technical+leaflet&p_File_Name=asc-lb-ds-9800.pdf&p_Doc_Ref=LB-DS-ASC9800MAVTRNLB. Acesso em: 01/09/2020.
- Bearn, P. (2012). Specifying, applying load-bank systems. **Consulting-Specifying Engineer**. URL <https://www.csemag.com/articles/specifying-applying-load-bank-systems/>. Acesso em: 01/09/2020.
- Boylestad, R.L. & Nashelsky, L. (2013). *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*. Pearson Education do Brasil Ltda., São Paulo, SP, 11ª edição.
- Callister Jr., W.D. & Rethwisch, D.G. (2016). *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. LTC — Livros técnicos e Científicos Editora Ltda., Rio de Janeiro, RJ, 9ª edição.
- Cassandras, C.G. & Lafortune, S. (2008). *Introduction to discrete event systems*. Springer, Boston, EUA, 2ª edição.
- Coolingzone (2005). Calculating flow rate in an enclosure. **Coolingzone**. URL <https://www.coolingzone.com/library.php?read=546>. Acesso em: 01/09/2020.
- David, R. & Alla, H. (2010). *Discrete, continuous, and hybrid Petri nets*. Springer-Verlag GmbH, Berlin, Alemanha, 2ª edição.
- Eagle Eye Power Solutions (2020). LB-series digital AC portable resistive three phase load banks (10–1,000kW). **Eagle Eye Power Solutions**. URL <https://eepower.com/wp-content/uploads/2019/12/lb-series-ac-resistive-three-phase-data-sheet-112019.pdf>. Acesso em: 01/09/2020.
- Hrúz, B. & Zhou, M.C. (2007). *Modeling and control of discrete-event dynamic systems: with Petri nets and other tools*. Springer, Londres, Reino Unido.
- Oliveira, R.G. (2018). *Projeto, modelagem e implementação de uma carga resistiva controlável para aplicação em corrente alternada*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Powell, R.W. (1936). The thermal and electrical conductivities of metals and alloys: Part 2, some heat-resistant alloys from 0°C to 800°C. *Proceedings of Physical Society*, 48(3), 381–392.
- Schmidt, W. (2010). *Materiais elétricos: condutores e semicondutores*, volume 1. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP, 3ª edição.
- Sedra, A.S. & Smith, K.C. (2007). *Microeletrônica*. Pearson Makron Books, São Paulo, SP, 5ª edição.
- Simplex (2020). Load bank fundamentals. **Simplex Direct**. URL <https://www.simplexdirect.com/loadbanksEducation.aspx>. Acesso em: 01/09/2020.
- Worldwide Power Products (2020). Load bank types: resistive vs reactive vs resistive/reactive vs electronic. **W Power Products**. URL <https://www.wpowerproducts.com/news/load-bank-types/>. Acesso em: 01/09/2020.