

Modelo BCF para Balanceamento de Carga em Redes Elétricas de Baixa Tensão via Redes de Petri Hierárquicas ^{*}

José R. Sicchar ^{*} Carlos T. Da Costa Jr. ^{**} Raimundo C. De Oliveira ^{*}

^{*} Depto. Eng. Controle & Automação, Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas, AM, (e-mail: jvilchez@uea.edu.br rcoliveira@uea.edu.br).

^{**} ITEC- Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, PA (e-mail: cartav@ufpa.br)

Abstract: The load imbalance in the low-voltage grid phases compromises the load stability also power quality provided to the final consumer. In this, sense, the phase-load-balance of grid by dynamic switching, is an efficient way for this problem. However, is important to establish a load stability for a long-lasting. This article proposes a phase balance local controller model based on combined algorithms, that considers beyond the current state of monthly load consumption (of final consumers) its twelve-step forward forecast. Providing, an optimal switching selection based on, the load consumption future state in the final consumer's phases. The model is developed in Hierarchical- Petri nets. The results point to an efficient attenuation of phase imbalance, applied to three kinds of consumers (single-phase, bi-phase, and three-phase). Therefore, ensuring in low-voltage circuits, the load balance for long-duration.

Resumo: O desbalanceamento de carga nas fases na rede elétrica de baixa tensão, compromete a estabilidade de carga nas fases e na qualidade de energia fornecida ao consumidor final. Nesse sentido, o balanceamento de carga nas fases da rede via comutação dinâmica, é uma alternativa eficiente para esse problema. Entretanto, torna-se necessário, estabelecer um estado de equilíbrio de carga com longa duração. Este trabalho, propõe um modelo de controlador local de balanceamento de fases (com algoritmos combinados) que considera além do estado atual de consumo mensal de carga (das unidades consumidoras) a sua projeção de doze saltos à frente. Proporcionando, uma seleção ótima de comutação, baseado no estado futuro de consumo de carga nas fases do consumidor final. O modelo é desenvolvido em redes de Petri hierárquicas, e os resultados indicam atenuação eficiente do desbalanceamento de fases, aplicado nos três tipos de consumidores finais (monofásicos, bifásicos e trifásicos). Garantindo-se portanto, em circuitos de baixa tensão, o equilíbrio de carga por longa duração.

Keywords: Phase-load balance; Low-Voltage grid; Local-controller; Hierarchical-Petri nets; Smart-Grids.

Palavras-chaves: Balanceamento de carga nas fases; Rede de Baixa-Tensão; Controlador local; Redes de Petri hierárquicas; Redes elétricas inteligentes.

1. INTRODUÇÃO

As diretrizes das redes elétricas inteligentes (REI) ou *smart grids* (SG) abrangem também o controle da estabilidade de carga e da qualidade da energia elétrica do consumidor final (da rede legada de distribuição de energia elétrica de baixa tensão (BT)). De modo, a garantir de forma ininterrupta, contínua, resiliente, confiável e segura, o fornecimento de energia elétrica, e a estabilidade de carga nas fases das unidades consumidoras finais (UFCs). Seja, esta na modalidade passiva do usuário final (apenas como consumidor) ou na modalidade ativa ou produtora independente de energia (prosumidor) Ma et al. (2017).

Mantendo-se consequentemente, o desbalanceamento médio de carga entre as fases (DMC) equilibrado, a corrente de neutro ($IN \approx 0$) eficazmente atenuada e, a variação de tensão estável. Obtendo-se consequentemente, com isso, a adaptação (*retrofitting*) da infraestrutura dos circuitos e da rede e BT como SG. Contudo, no cenário atual o problema de desbalanceamento de cargas em circuitos da rede legada de BT, tem se intensificado em função de alguns fatores causados entre outros, pelos hábitos do consumidor final, crescimento desorganizado e contínuo de cargas monofásicas (internas residenciais) e ligações clandestinas. Causando entre outros efeitos nocivos, o desequilíbrio de carga entre as fases da rede, aumento da corrente de neutro, desperdício e perdas de energia e, a diminuição da qualidade de energia fornecida ao consumidor final, Gomes et al. (2019).

^{*} Este trabalho recebeu o valioso suporte da UEA (GPA 2021-2022) e FAPEAM. Permitindo a realização do projeto de pesquisa.

Nesse sentido, a revisão literária, indica duas principais técnicas de balanceamento de carga, nas fases da rede de BT: i) balanceamento de carga via injeção de corrente de microrredes elétricas - *microgrids* (MG) ou multimicrogrids (MMG) e; ii) balanceamento de carga nas fases *phase-load-balance* (PLB), Bao and Ke (2019).

O balanceamento de carga via injeção de corrente por microgrids ou multimicrogrids baseadas na geração de fontes distribuídas de energia alternativas, convencionais ou híbridas demonstra resultados satisfatórios e bastante promissores, em relação à manutenção e resiliência do estado de equilíbrio de carga entre as fases de um circuito de BT. Isso, em função da recuperação da capacidade auxiliar de carga e energia injetada na rede interna das UCFs (prosumidoras). Causando, o efeito "resiliência em cascata" do equilíbrio de carga, nas fases do consumidor, e consequentemente, nas fases do transformador de BT. Causando, também o efeito de armazenamento de energia "produzida" para uso posterior de balanceamento de carga, e de uso na rede interna da UCF, bem como da "injeção" compensatória na rede secundária, e como agente de balanceamento de carga entre as fases do transformador, Xu et al. (2018). Todavia, observa-se que a obtenção do equilíbrio de carga, e da compensação de crédito (na conta de consumo de energia do prosumidor) tem um tempo médio de retorno a mediano e curto prazo. Notando-se que, em países em desenvolvimento e emergentes há ainda, poucos incentivos e políticas públicas de implementação em massa de MG via FGDs, nos clientes de BT. Tornando-se uma solução interessante, porém ainda inviável de aplicação em massa, na redução do desbalanceamento de carga na rede secundária, El-Hendawi et al. (2018).

Por outro lado, o balanceamento de carga nas fases (BCF) via comutação dinâmica de carga entre as fases de BT do transformador, torna-se uma alternativa interessante em função da obtenção do estado de equilíbrio de carga em curto espaço de tempo e, pelo seu baixo custo de implementação para os consumidores finais. O seu funcionamento consiste no remanejamento de cargas (vistas pelo transformador) ou UCFs, de alguma fase sobrecarregada, para outra com menor concentração de carga. Nesse sentido, alguns trabalhos mostram o objetivo de obter o melhor "arranjo" de comutação, isto é, a matriz de UCFs aptas para remanejamento de carga. Notando-se que, boa parte dos trabalhos desenvolvidos consideram o consumo atual de carga, corrente, tensão e energia das UCFs como parâmetros de seleção ótima da matriz de comutação. Destacando-se, o desenvolvimento via inferência difusa, para a detecção de fases desbalanceadas, e para transferência de cargas nas fases, Vuluvala and Saini (2018).

Analogamente, também se tem o desenvolvimento de heurísticas e algoritmos genéticos para minimização de consumo de tensão e carga nas fases das UCFs, bem como de carga e corrente de neutro Grigoras et al. (2020). Evidenciando-se bons e promissores resultados da manutenção do estado de equilíbrio de carga entre as fases, mas de curta duração (minutos, horas e dias). Causando a reaplicação diária da estimativa de seleção de comutação de UCFs, o que implica na curta resiliência do equilíbrio de carga, bem como do custo computacional de software dos sistemas de balanceamento de fases, Ivanov et al. (2019).

Alternativamente, os autores desenvolveram o modelo de um controlador local de balanceamento de carga, baseado em algoritmos combinados, no qual consideram-se além do consumo atual, a previsão mensal de carga com doze passos a frente. O que permite avaliar eficientemente de forma detalhada, o desempenho de cada UCF. Obtendo-se, um processo melhorado na obtenção da matriz de comutação, com melhora significativa do equilíbrio de carga com maior resiliência e duração (três a seis meses), Sicchar et al. (2018). Contudo, o processo foi baseado na avaliação de comutação de apenas UCFs monofásicas, deixando-se de lado as bifásicas e trifásicas. As quais, concentram um alto consumo de carga nas suas fases. Além de limitar, o processo de reconfiguração de carga do circuito de BT, em função de apenas UCFs monofásicas (pela facilidade de comutação nas fases da rede secundária).

Identificando-se portanto, uma oportunidade de desenvolvimento de melhora, na solução via o método BCF, aplicado em todas as UCFs de um mesmo circuito de BT (monofásicas, bifásicas e trifásicas). Apostando, na melhora da resiliência do estado de equilíbrio, a atenuação da corrente de Neutro, bem como da melhora de seleção da matriz de comutação, e do aumento de possibilidades de reconfiguração de carga na rede de BT.

Neste trabalho propomos, a extensão de aplicação do modelo BCF de balanceamento de fases na rede legada de BT em todos os tipos de UCFs (monofásicos, bifásicos e trifásicos), com a finalidade de atenuar eficazmente o desbalanceamento médio entre as fases, a corrente de neutro, bem como o tempo de duração do estado de equilíbrio de carga entre as fases da rede secundária.

O sistema será composto por quatro algoritmos combinados, que processam: i) a identificação de desbalanceamento de carga entre as fases; ii) a identificação de concentração de consumo de carga atual nas fases das UCFs; iii) a previsão mensal dos estados de consumo de carga em doze passos a frente e; iv) a seleção de UCFs para comutação. O modelo do fluxo de automação será desenvolvido como sistemas a eventos discretos (SED), via redes de Petri Hierárquicas para caracterizar as subredes envolvidas e sua integração com a infraestrutura do sistema legado de BT. A marcação de balanceamento de fases, terá "marcação distinguível" através de tags coloridas, para elucidar o fluxo de automação de cada tipo de consumidor final.

Espera-se como benefícios do sistema o balanceamento de carga das fases da rede secundária com maior duração, por meio da diminuição significativa do desbalanceamento médio entre as fases e da corrente de Neutro, realizado por um procedimento alternativo, eficiente e confiável. Além de, proporcionar ao consumidor final, fases balanceadas em função do seu consumo atual e futuro de carga.

A organização deste artigo, apresenta na sua primeira seção a contextualização da proposta; na sua segunda seção, o background do arcabouço teórico usado no desenvolvimento da pesquisa; na sua terceira sessão apresenta a arquitetura do sistema proposto; na sua quarta seção o modelo SED do sistema de balanceamento de carga; na quinta seção os resultados de simulação e sua discussão; e na sua seção final as conclusões e indicação de desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. BACKGROUND

Nesta seção, serão apresentadas as diretrizes que conformam o arcabouço teórico para o desenvolvimento da proposta. Primeiramente, será apresentado o estado da arte relacionado, com o balanceamento de fases aplicado, na rede legada de BT. A seguir, abordaremos algumas definições sobre redes de Petri Hierárquicas com marcas coloridas usadas nesta pesquisa.

2.1 Balanceamento de Carga nas fases da rede de BT

Na rede de BT legada "fases desbalanceadas" conformam um problema que compromete o estado de equilíbrio de cargas da rede, Mansani and Udaykumar (2016).

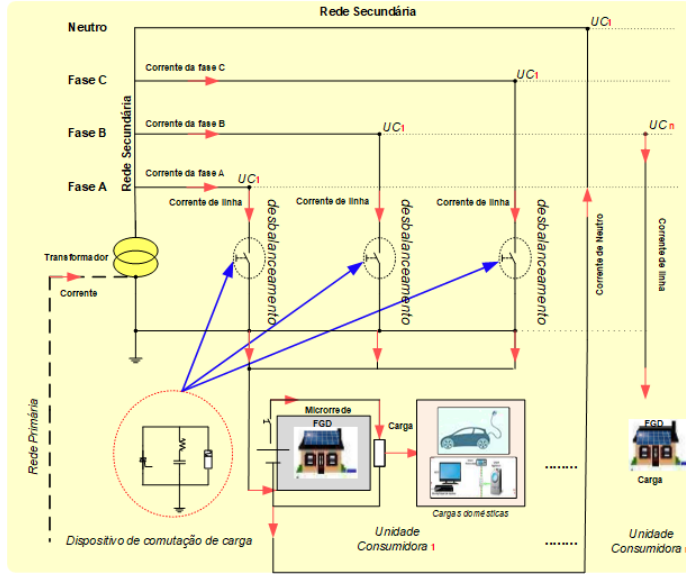


Figura 1. Balanceamento de carga na rede secundária.

O Balanceamento de Carga nas Fases (BCF) baseada na "Comutação Automática de Carga" é uma abordagem alternativa para solucionar, o problema do desequilíbrio de carga nas fases de BT, Vulvala and Saini (2018). A comutação eletrônica é aplicada por controladores locais (CL), em determinadas UCFs (vistas como cargas pelo transformador da rede) em fases sobrecarregadas, para fases com menor nível de carga como mostra a Figura 1. São empregados algoritmos que automatizam a minimização de carga e corrente, Grigoras et al. (2020), Siti et al. (2011) ou também tensão e carga, Ivanov et al. (2019), Shahnia et al. (2014). Em ambas as alternativas, o balanceamento de carga garante eficazmente o estado de equilíbrio de carga de forma segura e resiliente, bem como o retorno de compensação de energia em menor espaço de tempo, ao do balanceamento de carga por injeção de corrente vindas das MG ou MMGs, Bao and Ke (2019). Sendo possível considerar no balanceamento das fases também às UCFs prosumidoras com MG ou MMG, através de um controle coordenado de BCF síncrono, Vulvala and Saini (2018).

Neste trabalho, iremos desenvolver, o modelo de um CL de BCF cujo fluxo de controle é regido por um sistema de algoritmos combinados de suporte para a seleção da matriz de comutação aplicado a todos os tipos de UCFs, Sicchar et al. (2018).

2.2 Redes de Petri Hierárquicas (RPH)

A rede de distribuição elétrica legada de BT é considerada como um sistema complexo na sua infraestrutura e dos seus requisitos de serviços fornecidos ao consumidor final. Neste caso específico orientado à manutenção do estado de equilíbrio de carga e, da qualidade de energia para as UCFs. Nesse sentido, a sua caracterização pode ser desenvolvida como modelo formal de sistemas complexos visando a validação dinâmica do modelo, e da verificação de propriedades do fluxo de operação (workflow) gerado na rede de Petri (rdP), Vilchez (2019). O uso de extensões especiais de rdP pode facilitar esse processo inserindo-se no "grafo" do modelo, a abstração de hierarquia e a "distinguilidade". Assim, a primeira é aconselhável para representar, estratificar e analisar grandes sistemas e, a segunda, para caracterizar, a distinção de marcação do workflow de vários processos (incrementando-se a reusabilidade da rede) do fluxo de operação de BCF para cada tipo de UCFs. Portanto, o uso de rdP estendidas é muito adequado, pois é um método formal amplamente adaptado aos requisitos de engenharia de sistemas, pela sua ampla gama de recursos para a modelagem dinâmica de sistemas complexos, como a rede legada de BT com aplicações de retrofitting para SG, Vázquez et al. (2014).

Definição de Rede de Petri Hierárquica

- **Definição 2.1.1.** Rede de Hierárquica com marcas distinguíveis (RPH-D). A RPH-D é uma 7-tupla, de acordo com a Equação (1):

$$N = (P, T, A, w, M_0, F, D) \quad (1)$$

Onde:

- (1) A 5-tupla:

$$B = (P, T, A, w, M_0) \quad (2)$$

é uma rdP marcada, onde:

- P é o conjunto finito de lugares, $P \neq \emptyset$;
 - T é o conjunto finito de transições, $T \neq \emptyset$;
 - $A \subseteq (PxT) \cup TxP$ é o conjunto de arcos oriundos dos lugares às transições, e das transições aos lugares;
 - $w : A \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ é a função peso nos arcos, e
 - M_0 é a marcação inicial da rdP Reisig (2012).
- (2) F é uma função *Borda de Substituição por Lugar (BSL)* - Place-Bounded Substitution function (PBS). Que garante que existe uma sub-rede Y limitada por transições que podem ser substituídas por um macro-lugar s gerando-se uma outra rede: $N' = \{P', T', F'\}$, onde:
- $P' = P \setminus S_y \cup \{s\}$, onde S_y é o conjunto de lugares em Y ;
 - $T' = T \cup T_Y$, onde T_Y são as transições em Y ;
 - $F' = F \setminus Int(Y)$, onde $Int(Y)$ é o conjunto de arcos internos de Y .
- (3) D é o conjunto de marcas (tags) coloridas que se propagam nos P lugares e T transições, da rede principal e sub-redes de uma rdP - *Place Transition* (PT).

3. SISTEMA BCF

O sistema de balanceamento de carga (nas fases da rede secundária legada) proposto, é um controlador local denominado "balanceamento de carga nas fases"(BCF) e é baseado num sub-sistema de algoritmos combinados com quatro etapas, de acordo com a Figura 2. Este sistema, permite automatizar os procedimentos relacionados com a identificação de desbalanceamento de carga nas fases da rede, e nas fases das unidades consumidoras, bem como na seleção do arranjo de UCFs para o processo de comutação. Baseando-se na previsão de consumo de carga, das unidades consumidoras Sicchar et al. (2018). O fluxo de operação que rege a arquitetura BCF é baseado no fluxograma geral ilustrado na Figura 3.

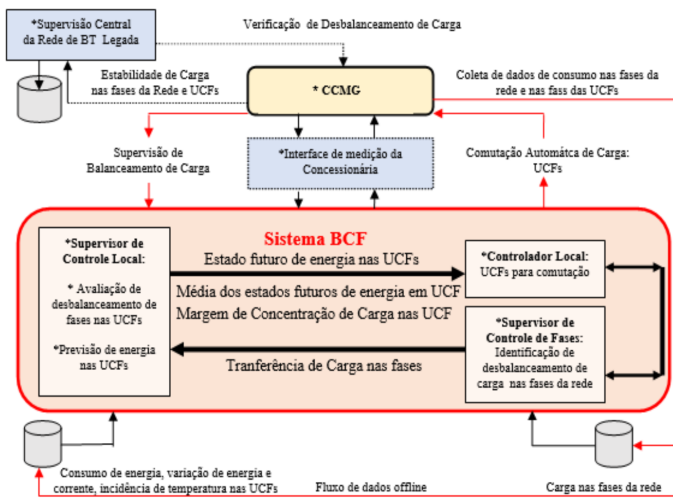


Figura 2. Arquitetura do Sistema BCF.

O sistema BCF interage com a interface de medição da concessionária de energia elétrica, e é composta de:

- Supervisor de Controle de Fases (SCF). Gerencia o procedimento de identificação de desbalanceamento de carga, nas fases da rede. Atendendo ao requerimento do sistema de controle central do sistema legado de BT. É baseado num sistema de inferência Fuzzy, Vilchez (2019). Os dados de consumo de carga são coletados de forma offline do Controle Central da Microrrede Urbana (CCMG) que é o centro de supervisão local da rede. Em caso de desbalanceamento nas fases é ativado o Supervisor de Controle Local (SCL).
- Supervisor de Controle Local (SCL). É ativado em caso de desbalanceamento nas fases da rede. Executa a identificação de desbalanceamento de carga (via inferência Fuzzy) e previsão de carga (via cadeias de Markov) nas fases das UCFs. Transferindo esse resultado ao CL. Os dados de consumo de energia, variação de energia, e variação de carga, são coletados offline do CCMG. A variação da temperatura e a variação do preço da energia são coletados offline externamente do centro de meteorologia e do sistema de informação de mercado, respectivamente.
- Controlador Local (CL). Recebe do SCL os estados futuros de consumo de carga e os níveis de desbalanceamento de carga das fases das UCFs, para selecionar o arranjo de comutação em função do nível de

desbalanceamento de carga e, também do estado de consumo de carga futuro. A seleção é verificada com os níveis de transferência de carga indicada pelo SCF em cada fase da rede. O resultado final da comutação é informado ao CCMG e ao sistema legado de BT.

3.1 Fluxograma Geral do Sistema BCF

A Figura 3, mostra em detalhes o fluxograma do sistema BCF e constitui um controle alternativo para o balanceamento de carga. Portanto, o sistema BCF pode ser inserido como uma interface de *retrofitting* na rede legada de BT.

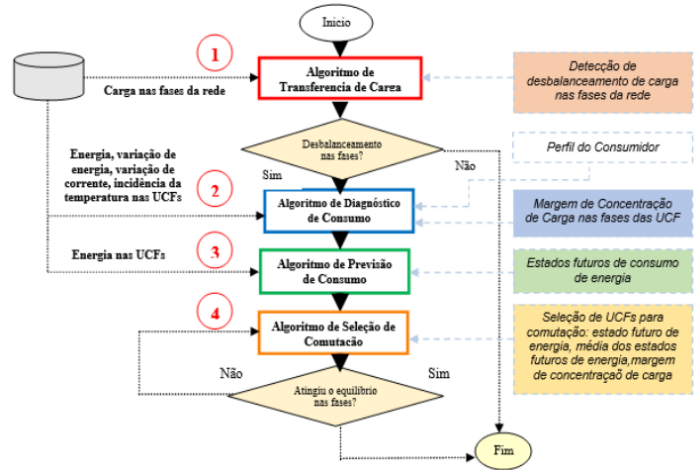


Figura 3. Fluxograma BCF.

O fluxograma do sistema BCF é explanado a seguir:

- (1) Algoritmo de Transferência de Carga (ATC). Inicia o fluxo. O nível de consumo de "carga" é diagnosticado em cada fase da rede. Sendo processados por uma inferência Fuzzy para detectar o desbalanceamento de carga. O resultado (informado pelo SCF) é o registro de desbalanceamento ou não de cada fase. No caso de desbalanceamento em alguma fase, ativa-se o segundo algoritmo. Senão o processo é encerrado.
- (2) Algoritmo de Diagnóstico de Consumo (ADC). Ativado quando uma das fases da rede está desbalanceada. Sendo processada na inferência de desbalanceamento de carga, para identificar o perfil do consumidor e do nível de desbalanceamento nas fases das UCFs. Este resultado será usado para melhorar a obtenção do arranjo de comutação.
- (3) Algoritmo de Previsão de Consumo (APC). Projeta os estados futuros de consumo de carga nas fases das UCFs desbalanceadas. O resultado de consumo futuro de carga, junto ao nível de desbalanceamento de carga, são usados para a seleção da matriz de comutação.
- (4) Algoritmo de Seleção de Comutação (ASC). Auxilia na obtenção de uma combinação confiável para o processo de comutação. É baseado nos estados futuros de consumo de carga em cada fase das UCFs e, no nível de desbalanceamento de carga diagnosticado. No caso de não ser encontrado um bom arranjo, um novo deve ser encontrado. Caso contrário o processo é finalizado.

4. MODELAGEM SED DO SISTEMA BCF VIA REDES DE PETRI HIERÁRQUICAS

(b) *Subrede MG*. Ilustrada na Figura 4b, no segundo nível hierárquico.

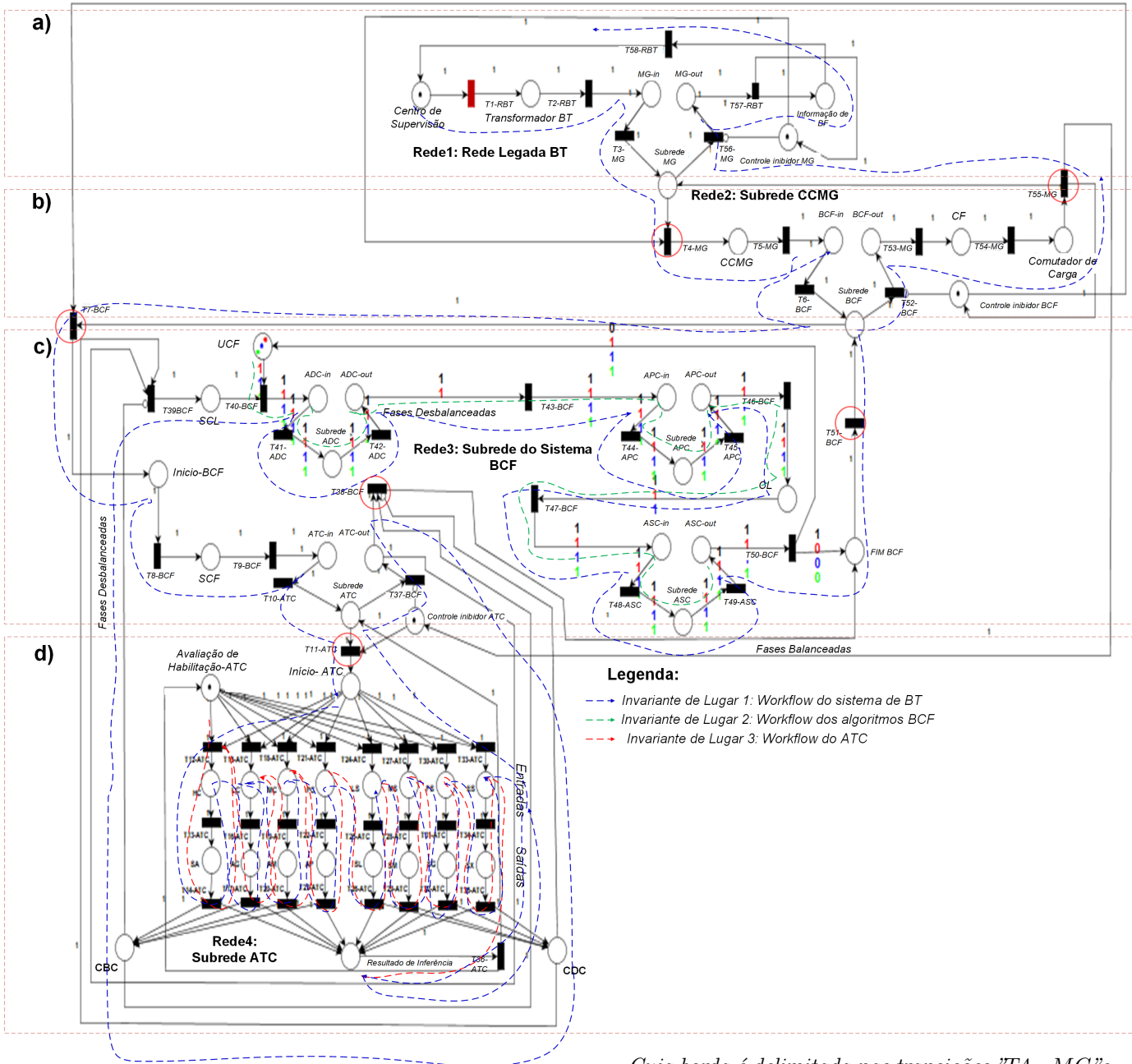


Figura 4. RPH: (a) Rede Legada de BT; (b) Subrede CCMG; (c) Subrede BCF; (d) Subrede ATC.

A Figura 4 ilustra a modelagem SED do sistema BCF inserido na rede secundária. Sendo o lugar inicial da rede, “Centro de Supervisão”, a transição “T1 – RBT” habilitada. Tendo-se, quatro camadas hierárquicas integradas (segundo a arquitetura explanada na seção 3) como segue:

(a) **Rede Legada de BT**. Ilustrada na Figura 4a, no primeiro nível da rede. Representa o modelo da rede secundária. O workflow é iniciado a partir do lugar “Centro de Supervisão”, continuando pelo lugar “Transformador BT”, a subrede “MG”. E pelo fluxo de retorno em “Informação BF”.

cuja borda é delimitada nas transições “T4–MG” e “T55–MG”. Representa o CCMG integrado à rede. O sistema BCF está inserido como inteligência embarcada. Composta pelo lugar “CCMG”, subrede “BCF”, lugares “CL” e “Comutador de Carga”.

(c) **Subrede BCF**. Indicada na Figura 4c, na terceira sub-camada. A borda é delimitada nas transições “T7 – BCF” e “T51 – BCF”. Representa o sistema BCF com seus quatro algoritmos combinados: sub-redes “ATC”, “ADC”, “APC” e “ASC”.

(d) **Subrede ATC**. Ilustrada na Figura 4d na quarta camada, cuja borda é delimitada nas transições “T11 – ATC” e “T38 – BCF”. Representa o algoritmo ATC, que realiza o diagnóstico de desbalanceamento nas fases da rede de BT através de uma inferência Fuzzy, emulada com oito entradas e saídas respectivamente.

5. RESULTADOS

5.1 Validação e Verificação da RPH

Nesta seção são apresentados os resultados de validação dinâmica da RPH modelada, onde também está acoplada hierarquicamente a surede do sistema BCF proposto. Também são apresentados os resultados da verificação de propriedades da rede. Neste caso os invariantes de lugar para "verificar formalmente" os workflows de automação do sistema desenvolvido. Sendo empregando neste caso o editor Pipe, versão 4.3.0.

- **Validação dinâmica da RPH.** A Figura 4 ilustra a simulação da RPH com seus 52 lugares e 58 transições. Validando o workflow de automação integrada entre o sistema legado de BT, controle CCMG, o sistema BCF e dos algoritmos de balanceamento de carga (neste caso da inferência de transferência de carga). Todavia, para a caracterização de distinguibilidade das marcas nos fluxos da rede, foi considerada a definição indicada na Seção 2.2.1 e, seguindo para isso a seguinte conotação de distinguibilidade de marcação: *i*) **tag preta** para delimitar o fluxo das rotinas de controle (control); *ii*) **tag vermelha** para delimitar o fluxo das rotinas de processamento com UCFs monofásicas (mono); *iii*) **tag azul** para delimitar o fluxo das rotinas de processamento com UCFs bifásicas (bifa); e *iv*) **tag verde** para delimitar o fluxo das rotinas de processamento com UCFs trifásicas (trifa).

A RPH da Figura 4 foi validada como uma rdP simples estendida com quatro níveis de hierarquia, onde cada sub-rede é iniciada como um macro-lugar baseado no método *Place-Bounded-Substitution* (PBS). Foram realizadas várias simulações com mais de 10.000 disparos com intervalos de 50ms (entre cada disparo), e não se constataram paradas parciais ou total da rede (*deadlock*). Através da simulação dinâmica foram validados todos os workflows em cada subrede do sistema, bem como o seu acoplamento (integração) com as camadas superiores. Incluindo os workflows dos lugares com marcas coloridas (das subredes da rede BCF). Validando-se portanto, de forma eficiente o fluxo de automação integrada indicada na seção 4. Isto é o workflow de requisição de verificação de desbalanceamento até a execução de balanceamento de fases (ou não) da rede.

- **Análise de Invariantes de Lugar.** Foi realizada a análise de invariantes de lugar-P com a finalidade de verificar se a rede é limitada e viva (vivacidade sem paradas parciais ou *deadlock*). E especialmente para verificar os fluxos de automação existentes na RPH, isto é workflows com lugares de consumo constante de marcas, durante a propagação do fluxo dinâmico. Incluindo-se, a verificação do workflow dos lugares (subredes ADC, APC e ASC da rede BCF) com consumo constante de marcas coloridas.

Neste caso, a partir da RPH da figura 4 foram obtidas 03 equações de invariantes de lugar. Para a análise de invariantes de lugar foi também considerada a conotação da simulação dinâmica para a caracterização da distinguibilidade dos processos com tags coloridas, indicada na subseção 5.1.1. A conformação e análise de cada invariante é abordada a seguir:

- **Invariante de Lugar 1:** A equação 3 mostra a verificação do workflow do fluxo integrado de automação de balanceamento de carga. Cujas trajetória está demarcada pela rota destacada em "azul" na Figura 4. Tendo-se "47" lugares (dos "52") da rede com consumo constante de tag preta, uma marca (control) em cada lugar. Havendo a propagação de fluxo nas camadas hierárquicas inferiores e vice-versa, com consumo constante de tags coloridas (azul, vermelha e verde) por cada lugar nas subredes ADC, APC e ASC.

$$\begin{aligned}
 &M(\text{Centro Sup}, "control") + M(\text{Trafo BT}, "control") + \\
 &M(MG_{in}, "control") + M(\text{Subrede MG}, "control") + \\
 &M(CCMG, "control")M(BCF_{in}, "control") + \\
 &M(\text{Subrede BCF}, "control") + M(\text{In BCF}, "control") + \\
 &M(SCF, "control") + M(ATC_{in}, "control") + \\
 &M(\text{Subrede ATC}, "control") + M(\text{In ATC}, "control") + \\
 &M(HC, "control") + M(SA, "control") + \\
 &M(LC, "control") + M(AG, "control") + \\
 &M(MC, "control") + M(AM, "control") + \\
 &M(PC, "control") + M(AP, "control") + \\
 &M(LS, "control") + M(SL, "control") + \\
 &M(MS, "control") + M(SM, "control") + \\
 &M(FS, "control") + M(SG, "control") + \\
 &M(ES, "control") + M(SX, "control") + \\
 &M(\text{Resultado}, "control") + \\
 &M(ATC_{out}, "control") + M(SCL, "control") + \\
 &M(ADC_{in}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(ADC \text{ Subnet}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(ADC_{out}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(APC_{in}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(APC \text{ Subnet}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(APC_{out}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(CL, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(ASC_{in}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(ASC \text{ Subnet}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(ASC_{out}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(\text{Fim BCF}, "control") + M(BCF_{out}, "control") + \\
 &M(CF, "control") + M(\text{Comutador Carga}, "control") + \\
 &M(MG - out, "control") + M(\text{Inf BF}, "control") = 1
 \end{aligned} \tag{3}$$

- **Invariante de Lugar 2:**

$$\begin{aligned}
 &M(UCF, "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(ADC_{in}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(\text{Subrede ADC}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(ADC_{out}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(APC_{in}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(\text{Subrede APC}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(APC_{out}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(CL, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(ASC_{in}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(\text{Subrede ASC}, "control", "mono", "bifa", "trifa") + \\
 &M(ASC_{out}, "control", "mono", "bifa", "trifa") = 1
 \end{aligned} \tag{4}$$

A "equação 4" mostra a verificação do workflow de três algoritmos do sistema BCF (ADC, APC e ASC). Cujas trajetória está demarcada pela rota destacada em "verde" na Figura 4 conformado por "11" lugares (dos "18") da subrede. Tem consumo constante de tags coloridas (azul, vermelha e verde), por cada lugar nas subredes ADC, APC e ASC. Havendo a propagação de fluxo na camada da subrede ATC e vice-versa.

- Invariante de Lugar 3: A equação 5 mostra a verificação do workflow da subrede ATC. Cuja trajetória está demarcada pela rota destacada em "vermelho" na Figura 4. Notando-se um fluxo conformado por "17" lugares (dos "20") da subrede com consumo constante de tags pretas, ou seja uma marca (control) por cada lugar nos lugares da subrede. Havendo a propagação de fluxo hierárquico dentro da camada e propagação superior para o macrolugar da subrede ATC.

$$\begin{aligned}
&M(\text{Aval Hab ATC "control"}) + \\
&M(\text{HC, "control"}) + M(\text{SA, "control"}) + \\
&M(\text{LC, "control"}) + M(\text{AG, "control"}) + \\
&M(\text{MC, "control"}) + M(\text{AM, "control"}) + \\
&M(\text{PC, "control"}) + M(\text{AP, "control"}) + \\
&M(\text{LS, "control"}) + M(\text{SL, "control"}) + \\
&M(\text{MS, "control"}) + M(\text{SM, "control"}) + \\
&M(\text{FS, "control"}) + M(\text{SG, "control"}) + \\
&M(\text{ES, "control"}) + M(\text{SX, "control"}) + \\
&M(\text{Resultado, "control"}) = 1
\end{aligned} \quad (5)$$

5.2 Simulação do Sistema BCF

Nesta seção apresentamos os resultados de simulação do sistema BCF. Seguindo-se o workflow validado na Seção 5.1. Para isso foi desenvolvido um estudo de caso num circuito de BT com 51 UCFs (monofásicas, bifásicas e trifásicas) da cidade Manaus. A simulação foi realizada no ambiente Matlab, versão 2015.

A Tabela 1 apresenta, a avaliação de desbalanceamento das fases do circuito de BT em estudo. Mostram-se a tensão e corrente em cada fase, o valor da corrente de neutro I_N e, o desbalanceamento médio de carga nas fases (DMC).

Tabela 1. Situação do circuito de BT.

Parâmetro	I_N (A)	Fase A	Fase B	Fase C	DMF
Carga (Kw)	-	32	17	12	13,3
I (A)	38,3	-91,2	48,5	34,3	

Assim, em razão de $I_N > 0$ calculada pela equação 6 e $DMC > 0$ calculada pela equação 7 o circuito está desbalanceado. Notando-se neste que a "Fase A" é a fase com maior concentração de carga.

$$DMC(Kw) = \frac{(|F_A - F_B| + |F_B - F_C| + |F_C - F_A|)}{3} = 13.3 \quad (6)$$

$$I_N = I_{F_A} + I_{F_B} + I_{F_C} = 38.28(A) \quad (7)$$

A Tabela 2 apresenta a "matriz de comutação" de UCFs na fase A, como um dos resultados do ASC. Neste caso, são indicadas as UCFs monofásicas selecionadas para comutação (C), ou não comutar (NC) para o processo de balanceamento de carga nas fases. Assim, torna-se possível aplicar um processo confiável baseado em critérios que descrevem, além do consumo atual de carga, a projeção do estado futuro de consumo de carga (EFC) bem como as margens limite de concentração de carga em cada fase das UCFs Sicchar et al. (2018). Os resultados dessa matriz de comutação permitiram diminuir eficientemente a corrente de Neutro e o DMC, como é mostrado na Figura 5.

Para uma validação comparativa, realizamos a aplicação dos métodos aplicados em cima dos dados experimentais do circuito em avaliação: método legado, método Fuzzy-T com ajuste de erro médio, método BCF1 e método BCF-2 (variações particulares do método BCF para transferência de carga nas fases de BT) conforme indica a Tabela 3.

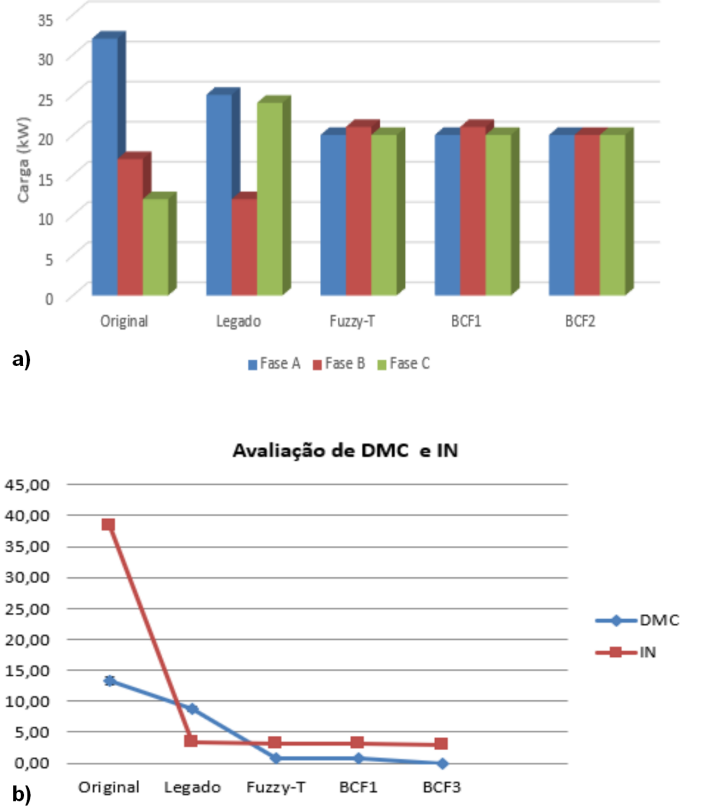


Figura 5. Validação do Sistema BCF: (a) Transferência de Carga nas fases; (b) DMC e IN.

Na Figura 5 ilustram-se os resultados de validação comparativa do sistema BCF. Observa-se na Figura 5a o resultado da transferência de carga em cada fase. Notando-se que atingiu-se melhor balanceamento com os métodos BCF-1 e BCF-2 (do sistema proposto). Também pode ser notado na Figura 5b, o resultado do DMC entre as fases sendo

Tabela 2. Matriz de Comutação- Fase A.

UCF	EFC	Avaliação	UCF	EFC	Avaliação
1	Alto	C	11	Alto	C
2	Alto	C	12	Alto	C
3	Médio	NC	13	Alto	C
4	Alto	C	14	Alto	C
6	Baixo	NC	15	Baixo	NC
7	Médio	NC	16	Médio	C
8	Médio	C	18	Alto	C
10	Alto	C	19	Alto	C

Tabela 3. Avaliação Comparativa do Sistema BCF.

Parâmetro	Original	Legado	Fuzzy-T	BCF-1	BCF-2
FA(Kw)	32	25	20	20	20
FB(Kw)	17	12	21	21	20
FC(Kw)	12	24	20	20	20
IN (A)	38,3	3,4	3,1	3,1	2,5
DMC(Kw)	13,3	8,7	0,6	0,1	0,0

em todo caso obtido o melhor resultado com a aproximação BCF-2. Todavia, mostra-se o menor resultado da corrente I_N atingida também pela solução BCF-2. Ficando demonstrado assim, a eficácia de balanceamento de fases pelo sistema proposto, cujo fluxo de operação é baseado na RPH validada. Todavia, destacamos que neste caso foi realizada a aplicação do sistema BCF, em todas as UCFs do circuito em estudo. Tendo sido realizado o diagnóstico de consumo de carga (atual e futuro) e aplicados como critérios na obtenção da matriz de comutação otimizada de balanceamento de fases.

Contudo, os resultados ainda são promissores para um estado de equilíbrio de cargas de longa duração, em razão da projeção do "estado futuro de consumo de carga" (EFC) ter considerado o histórico de consumo de 05 anos (2010 a 2014), Vilchez (2019). Tendo sido projetada neste caso o consumo para o mês de setembro de 2015 (um dos meses mais quentes do ano) para a obtenção da matriz de comutação nesse período (mensal).

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposto um novo modelo SED para um controlador local de balanceamento de fases em circuitos da rede legada de BT. Foi desenvolvida uma rede de Petri Hierárquica com inserção do sistema proposto com a propagação de hierarquia de tags coloridas nas subredes. Tendo sido validado o fluxo dinâmico da rede integrada e o seu acoplamento, com o sistema proposto. Validando-se também por análise de invariantes de lugar, os workflows de integração do sistema BCF com a rede do sistema legado de BT, bem como o workflow dos algoritmos combinados que conformam o sistema de balanceamento. Verificando-se a propagação de fluxos balanceados com consumos constantes de tags coloridas. Distinguindo-se assim, o processamento de cada tipo de UCF (monofásica, bifásica e trifásica), além do sinal de controle (tag preta). Permitindo-se com isso, a obtenção de rotinas confiáveis e eficientes para o processamento de balanceamento de fases de BT. Todavia, foi realizada a simulação do sistema em cima dos dados de um circuito de BT com avaliação comparativa com outros métodos da literatura e duas variações de transferência de carga no sistema BCF (BCF1 e BCF2, respectivamente). Obtendo-se os melhores desempenhos na transferência equilibrada de carga nas fases bem como da redução eficaz do desbalanceamento médio de carga, e da corrente de neutro.

Todavia, indicamos como trabalhos futuros a avaliação da duração do estado de equilíbrio de carga com projeção mensal e trimestral. Além da implementação do sistema em nível de hardware como controlador local de integração síncrona de balanceamento de carga, em circuitos da rede legada de BT com consumidores passivos e prosumidores com microgrids.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UEA, UFPA e USP por permitirem o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bao, G. and Ke, S. (2019). Load transfer device for solving a three-phase unbalance problem under a low-voltage distribution network. *Energies*, 12(15), 2842.
- El-Hendawi, M., Gabbar, H.A., El-Saady, G., and Ibrahim, E.N.A. (2018). Control and ems of a grid-connected microgrid with economical analysis. *Energies*, 11(1), 129.
- Gomes, R.C.S., Costa, C., Silva, J., and Sicchar, J. (2019). Smartlvgrid platform—convergence of legacy low-voltage circuits toward the smart grid paradigm. *Energies*, 12(13), 2590.
- Grigoras, G., Neagu, B.C., Gavrilas, M., Tristiu, I., and Bulac, C. (2020). Optimal phase load balancing in low voltage distribution networks using a smart meter data-based algorithm. *Mathematics*, 8(4), 549.
- Ivanov, O., Neagu, B.C., Gavrilas, M., Grigoras, G., and Sfintes, C.V. (2019). Phase load balancing in low voltage distribution networks using metaheuristic algorithms. In *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, 1–6. IEEE.
- Ma, T., Wu, J., and Niu, X. (2017). Reliability assessment indices and method for urban microgrid. *CIREN-Open Access Proceedings Journal*, 2017(1), 837–840.
- Mansani, S. and Udaykumay, R. (2016). An optimal phase balancing technique for unbalanced three-phase secondary distribution systems. In *2016 IEEE 7th Power India International Conference (PICON)*, 1–6. IEEE.
- Reisig, W. (2012). *Petri nets: an introduction*, volume 4. Springer Science & Business Media.
- Shahnia, F., Wolfs, P.J., and Ghosh, A. (2014). Voltage unbalance reduction in low voltage feeders by dynamic switching of residential customers among three phases. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(3), 1318–1327.
- Sicchar, J.R., Da Costa, C.T., Silva, J.R., Oliveira, R.C., and Oliveira, W.D. (2018). A load-balance system design of microgrid cluster based on hierarchical petri nets. *Energies*, 11(12), 3245.
- Siti, W.M., Jimoh, A., and Nicolae, D. (2011). Distribution network phase load balancing as a combinatorial optimization problem using fuzzy logic and newton–raphson. *Electric Power Systems Research*, 81(5), 1079–1087.
- Vázquez, C.R., Ramirez-Trevino, A., and Silva, M. (2014). Controllability of timed continuous petri nets with uncontrollable transitions. *International Journal of control*, 87(3), 537–552.
- Vilchez, J.R.S. (2019). Desenvolvimento a eventos discretos de um controlador de balanceamento de fases para sistemas legados de baixa tensão e microgrids. In *2019 Tese de Doutorado*, 1–5. Universidade Federal do Pará.
- Vuluvala, M.R. and Saini, L.M. (2018). Load balancing of electrical power distribution system: An overview. In *2018 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, 1–5. IEEE.
- Xu, Z., Zhang, Y., Liang, Y., Zeng, Z., Yang, P., Peng, J., He, T., and Chen, J. (2018). Multi-timescale coordinated optimization of hybrid three-phase/single-phase multimicrogrids. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 28(3), e2499.