

Sistema IGT para Balanceamento de Fases na Rede Legada de Baixa Tensão e Smart Grids. [★]

José R. Sicchar ^{*} Carlos T. Da Costa Jr ^{**} Weberston D. Oliveira ^{***}

^{*} Dep. Eng. Controle e Automação, EST, Universidade do Estado do Amazonas, AM, (e-mail: jvilchez@uea.edu.br).

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

^{***} Dep. Engenharia Elétrica, UNIFAP, (e-mail: wdoliveira@unifap.br)

Abstract: One of the main problems in the legacy low-voltage (LV), is the load imbalance that implies the phases' load stability and the energy quality supplied to the end consumers. The load phase balance by the dynamic switch through local controllers based on the *energy management consumption* is an interesting overview to establish lasting load balance. This article presents the load-phase balance system results based on combined algorithms, called *Transformer Management Intelligence* (TMI) which evaluates the load consumption, forecasting, and generation from consumption and "prosumers" units and generates a switching matrix that effectively attenuates, the unbalance load average (ULA) and the neutral current. Thus ensuring, the load balance phase over a long period of time, in the grid.

Resumo: Um dos principais problemas na rede elétrica de baixa tensão (BT) legada, é o desbalanceamento de carga que compromete a estabilidade de carga nas fases e a qualidade de energia fornecida aos consumidores finais. O balanceamento de carga nas fases por comutação dinâmica via controladores locais com metodologia *energy management consumption* é uma alternativa interessante para estabelecer o estado de equilíbrio de carga duradouro. Este trabalho, apresenta os resultados de um sistema de balanceamento de fases com algoritmos combinados, Inteligência de Gerenciamento do Transformador (IGT) que avalia o consumo, previsão e geração de carga das unidades consumidoras e prosumidoras, e gera uma matriz de comutação que atenua eficientemente, o desbalanceamento médio de carga (DMC) e corrente de neutro. Garantindo-se, o equilíbrio de carga nas fases com longa duração, na rede.

Keywords: Phase-Load Balance; Fuzzy systems; Markov chains; Legacy Low-Voltage grid; Smart-Grids.

Palavras-chaves: Balanceamento de carga nas fases; Sistemas Fuzzy; Cadeias de Markov; Rede Legada de Baixa Tensão; Redes Elétricas Inteligentes.

1. INTRODUÇÃO

Uma das diretrizes do contexto das redes elétricas inteligentes (REI) ou Smart-Grids (SG) é a estabilidade de carga, que garante a qualidade de energia fornecida aos consumidores finais, neste caso específico, da rede legada de baixa tensão (BT) onde estão sendo desenvolvidas as especificações e requisitos de adaptação e modernização de SG, com consumidores finais passivos e produtores de energia (prosumers ou prossumidores), Rana et al. (2019).

Especificamente, observa-se que o problema de desbalanceamento de cargas na rede legada de BT, acontece em função de alguns fatores, como os hábitos do consumidor final, crescimento desorganizado e contínuo de cargas monofásicas e ligações clandestinas. Causando, o desequilíbrio de carga nas fases da rede, o aumento da corrente de neutro e as perdas de energia bem como, o decréscimo da qualidade de energia fornecida, Jimenez et al. (2022).

A revisão literária, indica entre outras, duas principais técnicas de balanceamento de carga, aplicadas 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 cenário do balanceamento de carga via injeção de corrente por microgrids ou multimicrogrids via fontes de geração distribuídas (FGDs) de energias alternativas, convencionais ou híbridas mostram resultados satisfatórios e bastante promissores, em relação à manutenção e resiliência do equilíbrio de carga nas fases de BT. Devido, a recuperação da capacidade auxiliar de carga e energia injetada na rede interna das unidades prosumidoras. Causando, a "resiliência em cascata" do equilíbrio de carga, nas fases do consumidor, e nas fases do transformador. Havendo o armazenamento de energia "produzida" para uso posterior de balanceamento de carga, consumo interno das unidades consumidoras finais (UCFs), "injeção" compensatória na rede secundária, e para balanceamento de carga entre as fases do transformador, Chang et al. (2022).

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

Observando-se todavia 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 via FGDs. Tornou-se uma solução interessante, porém ainda inviável de aplicação em massa, para a redução do desbalanceamento de carga na rede secundária, Nasir et al. (2022).

Alternativamente, o **balanceamento de carga nas fases** (BCF) via comutação dinâmica de carga entre as fases 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), as 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).

Todavia, o desenvolvimento de heurísticas e algoritmos genéticos aplicados na minimização de consumo de tensão e carga nas fases das UCFs, bem como da carga e corrente de neutro, vem gerando promissores resultados da manutenção do estado de equilíbrio de carga entre as fases dos circuitos de BT, Jimenez et al. (2022). Observando-se entretanto, aplicação de transferência de carga baseado em apenas em UCFs monofásicas, apresentando ainda curta duração (minutos, horas e dias) do estado de equilíbrio de carga nas fases. 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 Grigoras et al. (2020).

Analogamente, os autores desenvolveram o modelo de um controlador local de balanceamento de carga, baseado em algoritmos combinados aplicado em apenas UCFs monofásicas, pela facilidade de comutação nas fases da rede secundária. Neste caso, consideram-se além do consumo atual, a previsão mensal de carga com doze passos a frente. Permitindo-se assim, avaliar eficientemente em detalhes o desempenho das UCFs em circuitos da rede legada de BT. Obtendo-se como resultado, a obtenção da matriz de comutação (UCFs selecionadas) cuja aplicação pós-balanceamento causa consequentemente, a redução do *desbalanceamento médio de carga-(DMC)* e da *Corrente Neutro-(I_N)* e, a melhora significativa do equilíbrio de carga com maior resiliência e duração (três a seis meses), Sicchar et al. (2018). Entretanto, o processo foi baseado na avaliação de comutação de apenas UCFs monofásicas, deixando-se de lado as bifásicas e trifásicas e também as unidades prosumidoras. Notando-se que as UCFs bifásicas e trifásicas concentram um alto consumo de carga nas suas fases. Além de limitar, a otimização do processo de reconfiguração de carga do circuito de BT).

Nesse sentido, os autores também desenvolveram o modelo de sistemas a eventos discretos do fluxo de automação de um controlador local com algoritmos combinados, com a finalidade de mostrar o acoplamento de transmissão dos níveis hierárquicos que conformam o sistema, bem como o fluxo de processamento dos algoritmos de processamento, nos três tipos de consumidores (evidenciados pela marcação de tags coloridas). Mostrando-se na validação a melhora significativa do balanceamento das fases de um circuito de BT, Sicchar et al. (2022). Entretanto, sem abordar o processamento dos algoritmos combinados que geram a matriz de comutação baseado na avaliação do consumo atual e previsão de energia das UCFs.

No intuito de obter uma solução alternativa eficiente e confiável no problema de desbalanceamento de fases, este trabalho propõe a extensão de aplicação do modelo BCF de balanceamento de fases na rede legada de BT em todos os tipos de UCFs (monofásicas, bifásicas e trifásicas) e em unidades prosumidoras, com a finalidade de atenuar eficazmente o *DMC* entre as fases do transformador, a I_N bem como a melhora da duração do equilíbrio de carga.

O sistema denominado **Inteligência de Gerenciamento do Transformado** (IGT) é formado por quatro algoritmos combinados, que realizam: i) a identificação de desbalanceamento de carga entre as fases da rede, baseado em sistemas Fuzzy; ii) a identificação de concentração de consumo e produção de energia nas UCFs também baseado em sistemas Fuzzy; iii) a previsão mensal dos estados de consumo de energia em doze passos a frente baseado em cadeias de Markov e; iv) a seleção de UCFs para comutação baseado em sistemas Fuzzy.

Em função dos resultados atingidos do sistema proposto foram obtidos, a atenuação eficiente do *DMC* e, da I_N num circuito da rede legada de BT. Cuja validação foi comparada com outras técnicas da revisão bibliográfica e com o resultado de balanceamento apresentado previamente pelos autores numa aplicação de balanceamento em apenas UCFs monofásicas, Sicchar et al. (2018). Obtendo-se consequentemente como principal benefício o balanceamento de carga das fases da rede durante seis meses. Além de, proporciona ao consumidor fases balanceadas em função do seu consumo atual e futuro de energia, bem como a viabilidade de reprogramação de consumo futuro mensal.

A organização deste artigo, apresenta na sua primeira seção a contextualização da proposta; na sua segunda seção, aborda o background teórico da proposta; na sua terceira sessão aborda a arquitetura do sistema proposto; na sua quarta 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 abordadas as diretrizes que constituem o embasamento teórico do desenvolvimento do sistema proposto. Sendo abordado primeiramente, o estado da arte relacionado com o método **balanceamento de carga nas fases** ou *phase-load balance* (PLB) aplicados em circuitos da rede de BT e SG e; o **sistema de algoritmos combinados** que conformam o sistema *IGT* para aplicação de todas as UCFs e unidades prosumidoras (UPs).

2.1 Balanceamento de Carga nas fases de BT

Especificamente, na rede legada de BT o "desbalanceamento de fases" conforma um problema que compromete o estado de equilíbrio de cargas da rede e que compromete a qualidade da energia fornecida ao consumidor final, Vu-luvala and Saini (2018).

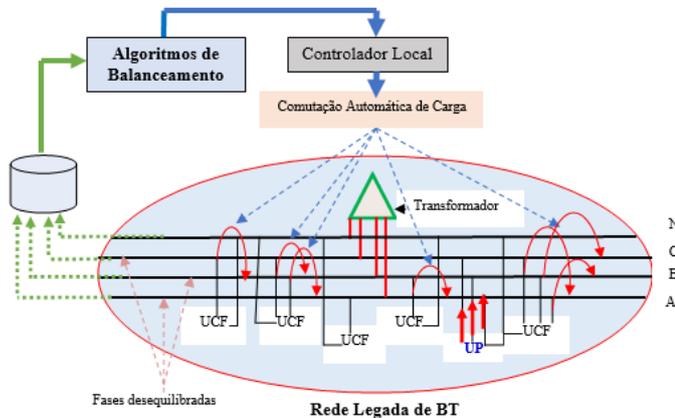


Figura 1. Balanceamento de carga na rede secundária.

Nesse sentido focaremos no método de "Balanceamento de Carga nas Fases" (BCF) baseada na *Comutação Automática de Carga* que é uma abordagem alternativa para solucionar o problema do desequilíbrio de carga nas fases da rede legada de BT, Ivanov et al. (2019). A comutação de carga 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. Sendo usados *Algoritmos de Balanceamento* que processam a obtenção da minimização de corrente-carga, e tensão-carga Jimenez et al. (2022); Grigoras et al. (2020). 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 UPs que tornam-se agentes dinâmicos de balanceamento injetando corrente das suas MG ou MMG à rede, através do controle coordenado de BCF síncrono, Nasir et al. (2022).

De forma específica, neste trabalho aborda-se o desenvolvimento do 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 e também considerando-se algumas UPs, Sicchar et al. (2022).

2.2 Algoritmos combinados do sistema IGT

No contexto do método BCF, os algoritmos de balanceamento que conformam as *inteligências de gerenciamento de consumo* podem ser desenvolvidos de forma individual ou de forma associada, ou seja, na forma de algoritmos combinados. Podendo conformar um fluxograma de aplicação por etapas ou de aplicação combinada desses algoritmos desenvolvidos inclusive em ambientes computacionais diferenciados Homae et al. (2019).

Assim, observa-se a aplicação de algoritmos combinados no balanceamento de fases seja pelo método BCF ou pela injeção de correntes de microgrids ou multi-microgrids Garces et al. (2021). Em ambos os casos foca-se na associação dos resultados parciais dos algoritmos (aplicados por etapas) para a obtenção de um resultado final que pode ser a obtenção de uma matriz de comutação (UCFs selecionadas) Jimenez et al. (2022) ou na detecção do "ponto" local, fase, UPs ou intervalo de tempo da aplicação da injeção de corrente das microgrids Nasir et al. (2022).

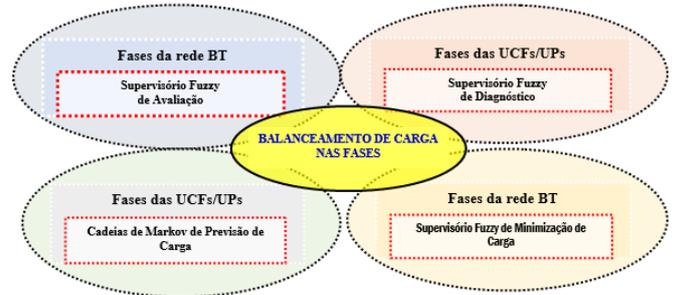


Figura 2. Algoritmos Combinados de Balanceamento de carga no Sistema IGT.

Num caso específico os autores desenvolveram um modelo BCF baseado em algoritmos combinados para balanceamento de carga baseado na avaliação do consumo e previsão de energia de UCFs monofásicas Sicchar et al. (2018) conforme ilustra-se na Figura 2. Notando-se a associação de quatro algoritmos combinados que processam: i) A avaliação da transferência de carga nas fases da rede, via um supervisório Fuzzy; ii) O diagnóstico de balanceamento das fases das UCFs, também via um supervisório Fuzzy; iii) A previsão do consumo de energia das UCFs por meio de cadeias de Markov e; iv) A seleção de comutação pela escolha de UCFs com maior índice de consumo atual e futuro de energia, via um supervisório Fuzzy. Neste trabalho, adotamos também esta estrutura porém com aplicação em todas as UCFs e UPs. Tendo-se o consumo e previsão de energia nas fases das UCFs e UPs, como parâmetros na geração da matriz de comutação.

3. ARQUITETURA IGT

O sistema de balanceamento de carga proposto é um controlador local denominado "inteligência de gerenciamento do transformador" (IGT) e é baseado na associação de quatro algoritmos combinados conforme mostra-se na Figura 3. Este sistema, permite automatizar os procedimentos relacionados com a identificação de desbalanceamento de carga nas fases da rede e nas fases das UCFs, bem como na seleção do arranjo para o processo de comutação. Baseando-se na previsão de consumo de energia das UCFs e UPs. O fluxo de operação que rege a arquitetura IGT é baseado no fluxograma geral ilustrado na Figura 4.

Na Figura 3 mostra-se no detalhe a comunicação integrada entre o sistema IGT com a interface de medição da concessionária de energia. Transferindo-se bidercionalmente as demandas e respostas de "Avaliação de Desbalanceamento de Carga" requeridas pelo *Gerenciador de Carga do Transformador* (GCT), que recebe essa requisição da *Supervisão Central da Rede de BT*.

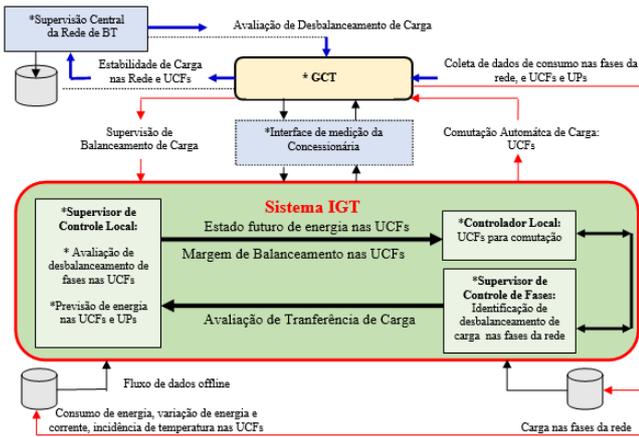


Figura 3. Arquitetura do Sistema IGT.

A arquitetura IGT é composta por:

- **Supervisor de Controle de Fases (SCF).** Gerencia o procedimento de identificação de desbalanceamento de carga via o processamento de "Avaliação de Desbalanceamento de Carga" baseado no cálculo do "DMC" e a " I_N ". Em caso de desbalanceamento nas fases é ativado o "Sistema de Avaliação de Transferência de Carga" baseado num sistema de inferência Fuzzy Mamdani que tem uma entrada do nível de "Carga" e uma saída a "Transferência de Carga" permitindo-se obter as faixas de adição ou subtração de carga em cada fase, Sicchar et al. (2018). Os dados de consumo são coletados de forma *offline* do banco de dados da concessionária local. Sendo após ativado o SCL.
- **Supervisor de Controle Local (SCL).** Executa a identificação de desbalanceamento de carga (via inferência Fuzzy) e previsão dos estados futuros de energia (via cadeias de Markov) nas fases das UCFs. Transferindo esse resultado ao CL para seleção de UCFs para comutação. Os dados de entrada do sistema Fuzzy: "consumo de energia", "variação de energia", e "variação de corrente" são coletados *offline* do sistema de informação da concessionária local de energia. A "incidência de temperatura" é coletada *offline* externamente do sistema de informação do centro de meteorologia. Processando-se consequentemente na saída, os níveis de balanceamento, em cada fase das UCFs.
- **Controlador Local (CL).** Recebe do SCL os estados futuros de consumo de energia e os níveis de desbalanceamento de carga das fases das UCFs para selecionar o arranjo de comutação de balanceamento, baseado nesses parâmetros. 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 GCT e à Supervisão Central de BT.

3.1 Fluxograma do Sistema IGT

A Figura 4 ilustra em detalhes o fluxograma do sistema IGT formando um controle alternativo para o balanceamento de carga. Observando-se a operação integrada entre os algoritmos combinados que conformam a sequência de processamento por etapas para a obtenção do balanceamento de carga nas fases do transformador.

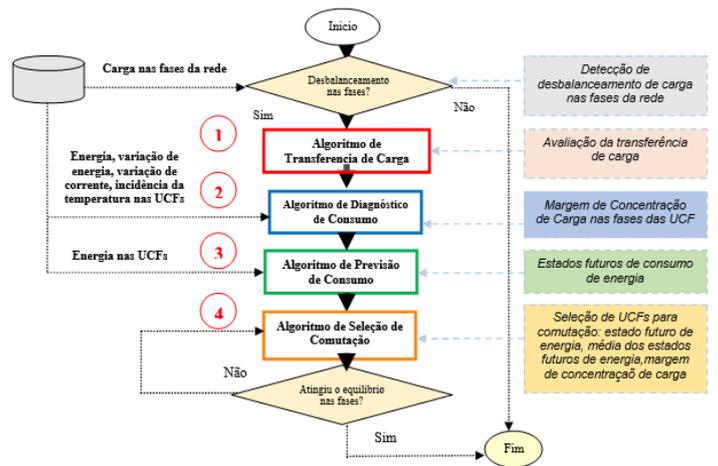


Figura 4. Fluxograma IGT.

A seguir é descrito o fluxograma dos quatro algoritmos combinados que integram, o sistema IGT:

- (1) Algoritmo de Transferência de Carga (ATC). Faz parte do SCF. É ativado quando houver desbalanceamento nas fases da rede após da avaliação do "DMC" e " I_N ". Por meio de Uma inferência Fuzzy Mamdani são obtidos os níveis de transferência de carga a serem adicionadas ou subtraídas em cada fase. A seguir é ativado o segundo algoritmo.
- (2) Algoritmo de Diagnóstico de Consumo (ADC). Ativado após do processamento do ATC. Faz parte do SCL. É formada por uma inferência Fuzzy Mamdani, que obtém as faixas de desbalanceamento de carga para identificar o nível de desbalanceamento nas fases das UCFs e UPs. Este resultado será usado na obtenção do arranjo de comutação.
- (3) Algoritmo de Previsão de Consumo (APC). Também faz parte do SCL. Formado por cadeias de Markov que projetam os estados futuros de consumo de energia nas fases das UCFs desbalanceadas. O resultado de previsão junto ao nível de desbalanceamento de carga, são usados para a seleção da matriz de comutação.
- (4) Algoritmo de Seleção de Comutação (ASC). Faz parte do CL. É formado também por uma inferência Fuzzy Mamdani que auxilia na obtenção da minimização de consumo de carga das UCFs. É baseado nos estados futuros de consumo de energia das fases das UCFs e, do nível de desbalanceamento de carga. O resultado mostra a valiação de carga "mínimo" em cada UCF, sendo selecionadas as que indicam menor consumo de carga. No caso de não ser determinado um bom arranjo, um novo deve ser encontrado. Caso contrário o processo é finalizado.

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados dos algoritmos do sistema IGT. São divididos numa primeira seção referente aos resultados dos algoritmos combinados; e numa seção que mostra a validação comparativa de balanceamento com outras técnicas de BCF aplicadas.

4.1 Resultados de Processamento IGT

Para a validação do sistema proposto foi realizado um estudo de caso, num circuito da rede legada de BT da cidade de Manaus. Cujos dados de consumo de carga são referentes ao período de consumo de carga de setembro de 2015 conforme mostra a Tabela 1. Constando de um transformador de 110 KVA (com aproximadamente 67 KW de potência ativa) e um total de 51 UCFs(45 monofásicas, 3 bifásicas e 3 trifásicas) entre as quais 2 UPs trifásicas.

Tabela 1. Consumo de Carga- Circuito de BT.

UCF- F_A	KW	UCF- F_B	KW	UCF- F_C	KW
1	2.0	21	0.6	21	0.5
2	2.3	22	0.1	37	0.1
3	1.6	23	0.6	38	1.3
4	1.2	24	1.0	24	0.8
5	1.0	5	0.6	39	0.2
6	1.8	25	0.1	40	0.6
7	1.8	26	0.1	41	0.1
8	1.5	27	1.5	42	0.1
9	0.7	9	0.5	9	0.2
10	2.5	28	1.7	43	1.8
11	2.0	29	1.0	44	0.1
12	0.2	30	1.2	45	0.6
13	1.8	31	1.5	46	0.1
14	2.5	32	0.1	47	1.6
15	2.4	33	0.1	48	0.5
16	2.7	34	0.1	49	1.4
17	1.0	17	1.0	17	0.5
18	0.5	35	1.7	50	0.2
19	1.5	36	2.5	51	1.0
20	1.,0	20	1.0	20	0.3
F_A	32	F_B	17	F_C	12

O consumo de carga é mostrada em detalhes na Tabela 1. Verificando-se a situação de desbalanceamento de carga na fase "A"do circuito conforme o cálculo mostrado na equação 1 indicando-se um "DMC"de 13,33 KW. Registrando-se também um valor de I_N de 38,28 A, conforme mostraram-se nas "expressões 1 e "2", respectivamente.

$$DMC = \frac{(|F_A - F_B| + |F_B - F_C| + |F_C - F_A|)}{3} = 13.33(KW) \quad (1)$$

$$I_N = I_{F_A} + I_{F_B} + I_{F_C} = 38.28(A) \quad (2)$$

Com esses resultados verifica-se o desbalanceamento de carga nas fases. Sendo então ativado o fluxograma IGT para o processamento de balanceamento de carga das fases do circuito, conforme os resultados a seguir.

4.2 Resultados do ATC

Constituído por uma inferência Fuzzy Mamdani com apenas uma entrada, "Carga"e uma saída, "Transferência de Carga". A variável de entrada contém "oito" S_{1i} conjuntos de pertinência que representam os possíveis níveis de concentração x_i de carga nas fases da rede com seus respectivos μ_i graus de pertinência, conforme definido na "expressão 3".

$$S_{1i} = \{(x_i, \mu_i(x_i)|x_i \in "Carga")\} \quad (3)$$

where : $i = 1 \dots 8$

A saída tem também "oito" S_{1j} conjuntos de pertinência que representam os y_j possíveis níveis de transferência de carga em cada fase, conforme definido na "expressão 4".

$$S_{1j} = \{(y_j, \mu_j(y_j)|y_j \in "Transf Carga")\} \quad (4)$$

where : $j = 1 \dots 8$

Ambas as variáveis formam a inferência definida, na "expressão 5".

$$\text{Se "Carga" é "x}_i\text{" então "Transf Carga" é "y}_j\text{"} \quad (5)$$

Na Tabela 2 mostram-se as fases balanceadas nas fases da rede: 20 KW na fase A, 21 KW na fase B e 20 KW na fase C, comparados com situação original de desbalanceamento. Indicando-se a quantidade de "Transferência de Carga"disponível para cada fase da rede: subtração de 12 KW da fase A, adição de 4 KW na fase B e 8KW na fase C, respectivamente.

Tabela 2. Resultados do ATC

Cenário	Fase A (KW)	Fase B (KW)	Fase C (KW)
Original	32	17	12
ATC	20	21	20
Transf-Carga	12	4	8

4.3 Resultados do ADC

Também é baseado numa inferência Fuzzy-Mamdani com quatro entradas: "Energia", "Variação de Energia", "Intensidade de Temperatura"e "Variação de Corrente"e uma saída: "Variação de Carga". As variáveis de entradas são definidas da seguinte forma.

- "Energia". Tendo três $S_{2_{ai}}$ conjuntos de pertinências que representam os possíveis x_{ai} níveis de "energia"em cada fase, com seus respectivos μ_{ai} graus de pertinência, como indica-se na "expressão 6".

$$S_{2_{ai}} = \{(x_{ai}, \mu_{ai}(x_{ai})|x_{ai} \in "Energia")\} \quad (6)$$

onde : $i = 1 \dots 3$

- "Variação de Energia". Tem também três $S_{2_{ai}}$ conjuntos de pertinência que representam os possíveis x_{bi} níveis de "variação de energia"nas fases das UCFs, com seu respectivo μ_{bi} grau de pertinência, conforme mostra-se na "expressão 7".

$$S_{2_{bi}} = \{(x_{bi}, \mu_{bi}(x_{bi})|x_{bi} \in "Variação Energia")\} \quad (7)$$

onde : $i = 1 \dots 3$

- "Intenidade de Temperatura". Formado por três $S_{2_{ci}}$ conjuntos de pertinência que representam os possíveis x_{ci} níveis de "variação de temperatura"como definido na "expressão 8".

$$S_{2_{ci}} = \{(x_{ci}, \mu_{ci}(x_{ci})|x_{ci} \in "Intens Temperatura")\} \quad (8)$$

onde : $i = 1 \dots 3$

- "Variação de Corrente". Tem três $S_{2_{di}}$ conjuntos de pertinência que representam os possíveis x_{di} níveis de "variação de corrente" conforme definido na "expressão 9".

$$S_{2_{di}} = \{(x_{di}, \mu_{di}(x_{di}) | x_{di} \in \text{"Variação Corrente"}\} \\ \text{onde : } i = 1 \dots 3 \quad (9)$$

A variável de saída tem três S_{2_j} conjuntos de pertinência que representam os possíveis " y_j níveis de "variação de carga" em cada fase das UCFs, com seu respectivo μ_j grau de pertinência, conforme definido na "expressão 10".

$$S_{2_j} = \{(y_j, \mu_j(y_j) | y_j \in \text{"Variação Carga"}\} \\ \text{onde : } j = 1 \dots 8 \quad (10)$$

As entradas e saídas inferem-se conforme a "expressão 11".

$$\begin{aligned} \text{Se "Energia" é "x_{ai}" e "Variação Energia" é "x_{bi}" e} \\ \text{"Intens Temperatura" é "x_{ci}" e} \\ \text{"Variação Corrente" é "x_{di}" entao} \\ \text{"variação Carga" é "y_{2j}"} \end{aligned} \quad (11)$$

Para o processamento foram consideradas três UCFs, a UCF 18-monofásica, a UCF 5-bifásica e a UCF 9-trifásica que também é UP. Para todas as UCFs foram as variáveis de entrada coletados entre 2010-2014. Conseqüentemente, o ADC permitiu obter os valores de "Variação de Carga"(VP), em função do "Consumo de Energia"(CE) "Variação de Energia"(VE), "Intensidade da Temperatura"(IT) e "Variação de Corrente"(VC).

A Tabela 3 mostra os níveis de carga na UFC-18.

Tabela 3. Níveis de Carga na UFC-18.

CE	VE (%)	IT (o)	VC(%)	VP(%)
Baixo	0,25	35	0,30	$\leq 0,5$
Médio	0,50	40	0,50	$> 0,5$
Alto	0,60	42	0,60	$> 0,5$

Analogamente, as Tabelas 4 e 5 mostram a "Variação de Carga" na fase A e fase B da UCF-5, respectivamente.

Tabela 4. Níveis de Carga, fase A, UFC-5.

CE	VE (%)	IT (o)	VC(%)	VP(%)
Baixo	0,25	35	0,30	$\leq 0,5$
Médio	0,40	38	0,40	$> 0,5$
Alto	0,60	42	0,60	$> 0,5$

Tabela 5. Níveis de Carga, fase B, UFC-5.

CE	VE (%)	IT (o)	VC(%)	VP(%)
Baixo	0,25	35	0,30	$\leq 0,5$
Médio	0,50	40	0,50	$> 0,5$
Alto	0,60	42	0,60	$> 0,5$

Por outro lado, as Tabelas 6, 7 e 8 mostram a "Variação de Carga" na fase A, fase B e fase C da UFC-9.

Tabela 6. Níveis de Carga, fase A, UFC-9.

CE	VE (%)	IT (o)	VC(%)	VP(%)
Baixo	0,25	35	0,30	$\leq 0,5$
Médio	0,40	38	0,40	$> 0,5$
Alto	0,60	42	0,60	$> 0,5$

Tabela 7. Níveis de Carga, fase B, UFC-9.

CE	VE (%)	IT (o)	VC(%)	VP(%)
Baixo	0,25	35	0,30	$\leq 0,5$
Médio	0,40	38	0,40	$> 0,5$
Alto	0,60	42	0,60	$> 0,5$

Tabela 8. Níveis de Carga, fase C, UFC-9.

CE	VE (%)	IT (o)	VC(%)	VP(%)
Baixo	0,25	35	0,30	$\leq 0,5$
Médio	0,50	40	0,50	$> 0,5$
Alto	0,60	42	0,60	$> 0,5$

4.4 Resultados do APC

Constituído por um preditor baseado em "Cadeias de salto de Markov" que projetam os "estados futuros de consumo de energia"(CF) nas fases das UCFs. Particularmente, neste caso é usada uma adaptação das equações de *Chalpmann-Kolmogorov* de acordo com a "equação 12".

$$C_{F_{\pi_{ij}}}^{(n)} = P\{X(k+n) = j | X(k) = i\} \\ \text{onde : } C_{F_{\pi_{ij}}}^{(n)} \geq 0 \quad (12)$$

A través da "equação 12" projeta-se a previsão futura de consumo de energia, definida pelos saltos de iteração do modelo " $C_{F_{\pi_{ij}}}$ " num período de tempo compreendido entre um instante inicial "n" até um instante específico futuro "m". Essa iteração é a concatenação combinatória entre as transições probabilísticas de asserção " i_k " nos estados " X_k " discretos "anteriores" de consumo e das transições probabilísticas de asserção " j_k " de " X_{k+n} " estados discretos futuros de consumo. Logo, a previsão de consumo de energia em "n" saltos de desempenho futuro é gerada buscando-se a estacionariedade do processo até "n-1" saltos.

Esse processo segue as seguintes etapas:

- Início do processo, fazendo várias iterações focando a estacionariedade do processo e a determinação da matriz estacionária (selecionando-se as melhores probabilidades de iteração) durante a previsão.
- Caso não se obtenha a estacionariedade, processam-se novas iterações com novas simulações computacionais;
- Geração dos saltos de transição, consumo anual e as previsões de consumo: via a matriz estacionária;
- Simulação das curvas de consumo para confronto das trajetórias das medições e da variável do modelo.

No final do processo, terá-se a previsão de consumo de energia das UCFs. Neste caso específico, considerando-se um horizonte de 12 passos à frente. Os resultados obtidos formam a matriz de consumo futuro para cada UFC que em função dela permite ter de forma objetiva e ampla, a situação de desbalanceamento atual e futuro de cada consumidor residencial.

Para o processamento dos resultados foram considerados o histórico de consumo de energia das UCFs do circuito em estudo entre 2010-2015 Sicchar et al. (2018). Para um caso demonstrativo de processamento são mostradas apenas as curvas de previsão da UCF-9 conforme ilustra a Figura 5.

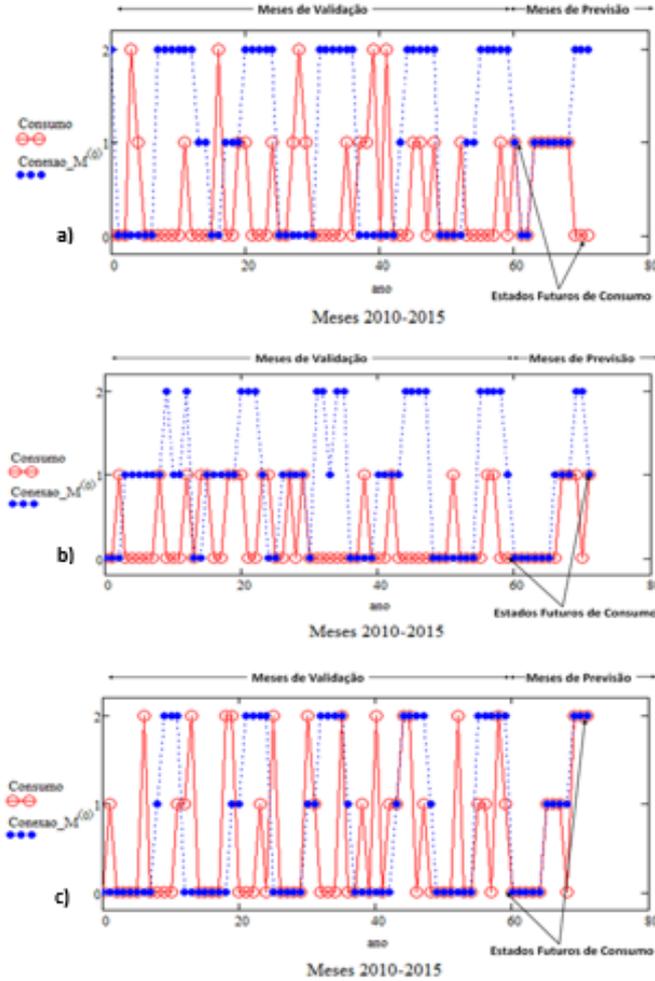


Figura 5. Previsão de consumo de Energia- UCF-9: a) Fase A; b) Fase B; Fase C.

Na Figura 5-a mostra-se a previsão de consumo de energia na "fase A". Descrevendo-se para os 12 meses de 2015 (doze passos à frente) boa margem de previsão de consumo futuro (75%), com acerto de 9 meses de um total de 12. Analogamente a Figura 5-b ilustra-se a previsão de consumo de energia na "fase B". Tendo-se para os 12 meses de 2015 (doze passos à frente) também boa margem de previsão de consumo futuro (75%), com acerto de 9 meses de um total de 12. Por outro lado, a Figura 5-c mostra-se a previsão de consumo de energia na "fase C". Tendo-se para os 12 meses de 2015 (doze passos à frente) excelente margem de previsão de consumo futuro (92%), com acerto de 11 meses de um total de 12.

4.5 Resultados do ASC

Também é baseado numa inferência Fuzzy-Mamdani com três entradas: "Estados Futuros de Energia"(EFE), "Média dos Estados Futuros de Energia "(MEFE), "Margem de

Concentração de Carga"(MCP) e uma saída: "Avaliação". As variáveis de entradas são definidas da seguinte forma.

- "EFE". Tendo três $S_{2_{ai}}$ conjuntos de pertinências que representam os possíveis x_{ai} "estados futuros de energia" nas fases com seus respectivos μ_{ai} graus de pertinência, como indica-se na "expressão 13".

$$S_{2_{ai}} = \{(x_{ai}, \mu_{ai}(x_{ai}) | x_{ai} \in \text{"EFE"}\} \quad (13)$$

onde : $i = 1 \dots 3$

- "MEFE". Tem também três $S_{2_{bi}}$ conjuntos de pertinência que representam os possíveis x_{bi} níveis da "média dos estados futuros de energia" nas fases das UCFs com seu respectivo μ_{bi} grau de pertinência, conforme mostra-se na "expressão 14".

$$S_{2_{bi}} = \{(x_{bi}, \mu_{bi}(x_{bi}) | x_{bi} \in \text{"MEFE"}\} \quad (14)$$

onde : $i = 1 \dots 3$

- "MCP". Formado por dois $S_{2_{ci}}$ conjuntos de pertinência que representam as duas possíveis x_{ci} situações da "margem de concentração de carga" nas fases, como definido na "expressão 15".

$$S_{2_{ci}} = \{(x_{ci}, \mu_{ci}(x_{ci}) | x_{ci} \in \text{"MCP"}\} \quad (15)$$

onde : $i = 1 \dots 3$

A variável de saída "Avaliação" tem dois S_{2_j} conjuntos de pertinência que representam as duas possíveis " y_j situações de avaliação das UCFs: "Comutar"(C) ou "Não Comutar"(NC) nas UCFs, com seu respectivo μ_j grau de pertinência, de acordo com "expressão 16".

$$S_{2_j} = \{(y_j, \mu_j(y_j) | y_j \in \text{"Avaliação"}\} \quad (16)$$

onde : $j = 1 \dots 8$

As entradas e saídas inferem-se conforme a "expressão 17".

$$\text{Se "EFE" é "x_{ai}" e "MEFE" é "x_{bi}" e "MCP" é "x_{ci}" então "Avaliação" é "y_{2j}" \quad (17)$$

Tabela 9. Matriz de Comutação-UCF9-Fase A.

UFC	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

A Tabela 9 mostra os resultados do ASC, a "matriz de comutação" das UCFs da fase A do circuito em estudo. Sendo indicadas as UCFs monofásicas selecionadas para comutação (C), ou não comutar (NC) para o processo de balanceamento de carga nas fases. Sendo possível aplicar um processo confiável baseado em critérios que descrevem, além do consumo atual de carga, a projeção do estado futuro de consumo de energia (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 o "DMC" e a " I_N ", como ilustra Figura 6.

4.6 Validação Comparativa

A Tabela 10 mostra os resultados da validação comparativa do sistema IGT com outros métodos: método legado, método Fuzzy-T e duas variações do IGT.

Tabela 10. Avaliação Comparativa da IGT.

Parâmetro	Original	Legado	Fuzzy-T	IGT-1	IGT-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

A Figura 6-a mostra o resultado da transferência de carga em cada fase do circuito em estudo. Atingindo-se o melhor balanceamento com os métodos IGT-1 e IGT-2. Analogamente, mostra-se na Figura 6-b o resultado do "DMC" entre as fases obtivendo-se o melhor resultado com a aproximação IGT-2 que também atingiu a menor " I_N ". Obtivendo-se o balanceamento homogêneo nas fases (com estabilidade de carga de seis meses). Evidenciando-se, a eficácia de balanceamento de fases pelo sistema proposto.

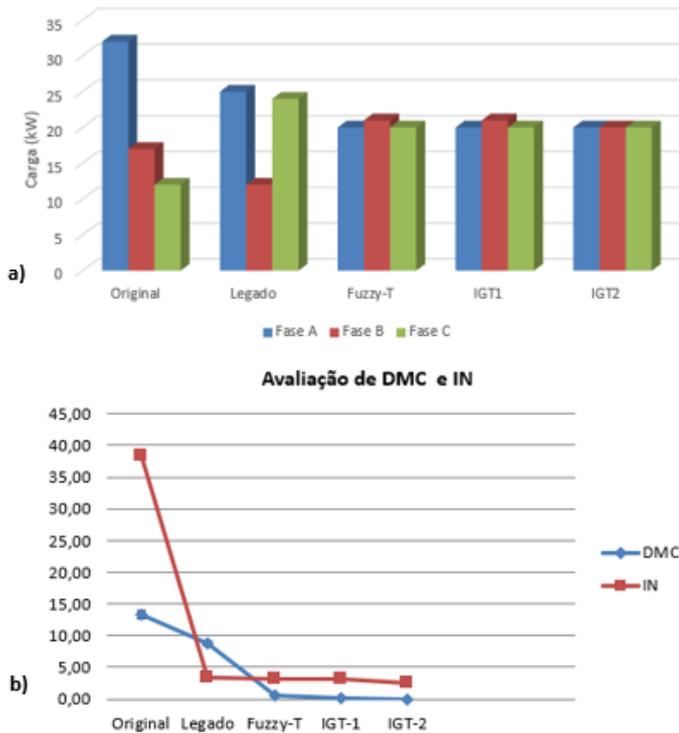


Figura 6. Validação do Sistema IGT: (a) Transferência de Carga nas fases; (b) DMC e IN.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentando o sistema IGT conformado por algoritmos combinados para o balanceamento de carga num circuito da rede legada de BT. Sendo a sua principal contribuição a avaliação das margens de carga e a previsão dos estado de consumo de energia nas UCFs para a obtenção da matriz de comutação de balanceamento. Os resultados validam a eficácia do sistema proposto, tornando-se uma alternativa promissora para um controle síncrono mixto de balanceamento de fases em Smart-Grids de BT.

Todavia, sugerimos como trabalhos futuros a implementação em hardware do sistema, bem como o desenvolvimento da seleção de comutação via algoritmos genéticos com novas variáveis para a minimização de consumo de carga.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UEA, UFPA e UNIFAP pelo incentivo da realização 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.
- Chang, C.K., Cheng, S.T., and Boyanapalli, B.K. (2022). Three-phase unbalance improvement for distribution systems based on the particle swarm current injection algorithm. *Energies*, 15(9), 3460.
- Garces, A., Gil-González, W., Montoya, O.D., Chamorro, H.R., and Alvarado-Barrios, L. (2021). A mixed-integer quadratic formulation of the phase-balancing problem in residential microgrids. *Applied Sciences*, 11(5), 1972.
- 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.
- Homaei, O., Najafi, A., Dehghanian, M., Attar, M., and Falaghi, H. (2019). A practical approach for distribution network load balancing by optimal re-phasing of single phase customers using discrete genetic algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(5), e2834.
- 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.
- Jimenez, V.A., Will, A.L., and Lizondo, D.F. (2022). Phase reassignment for load balance in low-voltage distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 137, 107691.
- Nasir, M.B., Hussain, A., Niazi, K.A.K., and Nasir, M. (2022). An optimal energy management system (ems) for residential and industrial microgrids. *Energies*, 15(17), 6266.
- Rana, A.S., Iqbal, F., Siddiqui, A.S., and Thomas, M.S. (2019). Hybrid methodology to analyse reliability and techno-economic evaluation of microgrid configurations. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(21), 4778–4787.
- 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.
- Sicchar, J.R., Da Costa Jr, C.T., and De Oliveira, R.C. (2022). Modelo bcf para balanceamento de carga em redes elétricas de baixa tensão via redes de petri hierárquicas. *XXIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 1–8.
- 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.