

Ferramenta Computacional para o Cálculo de Fluxo de Potência: Uma Nova Abordagem em Rede de Distribuição de Energia Elétrica Radial Fracamente Malhada com Geração Distribuída (GD) e Conrole Coordenado de Tensão (CCT)¹

WEVERSON DOS SANTOS CIRINO²

Master, Professor of Electrical Engineering
State University of Amazonas, Brazil

DANIEL GUZMÁN DEL RIO

Doctor, Professor of Electrical Engineering
State University of Amazonas, Brazil

UBIRATAN HOLANDA BEZERRA

Doctor, Professor of Electrical Engineering
Federal University of Pará, Brazil

Abstract

In this article, the authors present a new computational tool for solving the power flow calculation in radial and weakly meshed electrical energy distribution networks based on the summation of power (MSP) methodology, with and without the presence of distributed generation (DG), and with coordinated control of primary voltage (CCT-p), to determine the voltages in the buses, active and reactive powers of the system under study of the proposed electrical system. The strategy of this new computational tool consists of reading the properly tabulated input data of the distribution network under analysis (proposed scenario), and calculating the power flow itself, now using the power summation method. The iterations happen from the reference bar to the last bar, as well as in reverse form (Backward/Forward Sweep), until a defined permissible error is obtained. If convergence does not occur, the power flow calculation is interrupted. During the iterations, another technique is taken into account, Coordinated Control of Primary Voltage (CCT-p), to control the voltage in the buses, whether or not containing Distributed Generation (DG). This technique alters the bus voltage by controlling the active power in the electrical system. The results obtained show that the computational tool worked satisfactorily, because for the proposed scenarios of

¹ Computational Tool for Power Flow Calculation: a new approach in Weakly Meshed Radial Electric Power Distribution Network with Distributed Generation (DG) and Coordinated Voltage Control (CCT)

² Corresponding author: wdsantos@uea.edu.br

5, 9, and 34 bars, the result of the power flow, without DG, obtained a maximum absolute error of 0.05 and standard deviation of 0,038, and for the scenarios of networks with DG, it obtained an absolute error of 0,33 and a standard deviation of 0,78, in comparison with other software used in the market for the calculation of power flow.

Keywords: Power Flow, Coordinated Voltage Control, Distributed Generation.

1. INTRODUÇÃO

O principal objetivo de uma rede de distribuição é levar energia elétrica desde a subestação de distribuição até os consumidores finais, com qualidade e na quantidade em que for requerida. Um sistema elétrico de potência é constituído basicamente por três importantes setores, que são: (a) geração: formada pelos produtores que transformam a energia cinética ou potencial da natureza, como por exemplo, a água (hidráulica) ou calor (solar ou térmica), entre outras, em energia elétrica; (b) transmissão: as usinas geradoras de energia estão normalmente afastadas dos grandes centros consumidores, então tornasse necessário transmitir a energia gerada através das linhas de transmissão. Em virtude das limitações físicas e de isolamento elétrico, os geradores operam com tensões na faixa de 8 kV a 30 kV. Já as linhas de transmissão, por razões de minimização de perdas operam com tensões na faixa de 138 kV a 750 kV, sendo, portanto, necessária a transformação da tensão de geração para a tensão de transmissão. Para isso existem as estações elevadoras anexas às usinas geradoras, e; (c) distribuição: como existe a dificuldade dos consumidores de utilizarem a potência entregue nos níveis de tensão da transmissão, a mesma deve ser transformada nas subestações (SE) abaixadoras para níveis de tensão entre 34,5 kV e 138 kV na subtransmissão, entre 13,8 kV e 34,5 kV na distribuição Primária, e entre 127 V e 380 V na distribuição secundária.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Redes de Distribuição

As redes de distribuição primária, operando em média tensão, nas instalações aéreas adotam a configuração radial, tendo a possibilidade de transferência de blocos de carga entre circuitos para o atendimento da operação em situações de contingência. Embora as redes de distribuição possam adotar outras configurações (anel ou malha) a configuração radial é a que predomina, portanto, a de maior interesse.

2.2 Geração Distribuída

A geração distribuída (GD) consiste naquela geração de energia elétrica realizada junto ou próxima dos consumidores finais, independente da potência, tecnologia e fonte de energia. No início da década de 90 ficou evidente que o potencial energético das grandes bacias fluviais brasileiras estava quase esgotado. O que restava não poderia ser aproveitado sem impacto ambiental muito alto. Em consequência se incentivou a ligação das fontes de energia de GD nas redes de subtransmissão ou nas redes de distribuição primária, o que se constitui grande vantagem em virtude da fonte estar próxima do centro de carga, ocasionando menos perda de energia, e no caso de falha na rede provocando o ilhamento, o contínuo fornecimento da energia elétrica. Em 2004, ocorre um grande avanço quando a GD é mencionada na Lei 10.848/04 como uma das possíveis fontes de geração de energia. O detalhamento do Decreto 5.163/04 fornece características que ajudarão as empresas distribuidoras, que até então se opunham a esta forma de geração, a aceitarem a GD como uma das formas de mitigar riscos de planejamento. O fato é que a geração distribuída cresceu tanto que já representa uma parcela significativa da energia ofertada ao mercado consumidor, sem que seus efeitos sobre as redes das concessionárias tenham sido devidamente analisados.

2.3 Cálculo do Fluxo de Potência

O progresso na área de Fluxo de Potência (FP) de sistemas radiais é vital para uma eficiente operação e contínuo desenvolvimento destes

como um todo. Desenvolver novas técnicas e métodos para análise da rede elétrica utilizando dispositivos baseados em microprocessadores tem sido interesse de pesquisadores e engenheiros da área de potência nos últimos anos. O aperfeiçoamento das técnicas existentes e as novas metodologias visam melhorar cada vez mais a precisão dos resultados e a eficiência dos métodos. Desde sua formulação inicial na década de 60, muitos métodos têm sido propostos para resolver o problema do Fluxo de Potência para sistemas de distribuição radiais. A seguir destacamos alguns deles. Nos anos 50, empregava-se o método de Gauss-Siedel para a resolução do Fluxo de Potência [1]. Apesar de eficiente é considerado muito lento, pois necessita de um número excessivo de iterações para encontrar a solução. Aliado à baixa capacidade de processamento dos computadores da época tornava a método pouco utilizável. No final dos anos 60, W. F. Tinney et al. [2] apresenta a resolução do problema de Fluxo de Potência pelo método Newton-Raphson, cujo desenvolvimento considerava apenas as características dos sistemas de transmissão de energia (sistemas malhados), sem explorar computacionalmente características típicas de redes de distribuição (redes radiais). O método de Newton passou a ser uma referência no cálculo do Fluxo de Potência para redes malhadas, desde então, pois apresenta uma convergência rápida e eficiente [2]. Em 1967 surge o primeiro trabalho desenvolvido exclusivamente para sistemas de distribuição, R. Berg et al. [3] “*Mechanized calculation of unbalanced load flow on radial distribution circuits*”, que pode ser considerado como base para todas as variantes que seguiram. Neste trabalho apresentou um método iterativo de solução, baseado na teoria dos circuitos lineares, que utilizava técnicas especiais de redução de redes. O que se viu nas décadas de 60 e 70 foram os pesquisadores buscarem aperfeiçoar e desenvolver técnicas para revolver o problema de Fluxo de Potência voltado para transmissão, sendo que as pesquisas voltadas para as redes de distribuição não tiveram tanta ênfase. Os estudos de Fluxo de Potência eram realizados com pouca ou nenhuma análise, sendo assim superdimensionados. Com o passar do tempo às redes de distribuição foram submetidas a um aumento contínuo da demanda de

carga e, fazendo com que estes sistemas chegassem perto de sua capacidade máxima.

Em 1973, foi apresentado um método de solução, desenvolvido a partir do método iterativo de Gauss-Seidel, usando a matriz de impedâncias nodais, no qual se implementou as modificações necessárias para que as características particulares das redes de distribuição fossem consideradas no respectivo programa de análise multifásica de fluxo de potência [4]. No ano de 1974 foi apresentado por B. Scott e O. Alsaç um novo método de cálculo de fluxo de potência o qual apresenta um adequado desempenho e características de convergência, quando utilizados para a análise de redes de transmissão de energia [5]. Em 1976, W. H. Kersting e D. L. Mendive apresentaram uma abordagem para solução de Fluxo de Potência para redes radiais. Neste trabalho foi definido que aproveitando-se da topologia radial das redes de distribuição, estabeleceu uma nova alternativa de solução que se baseava na teoria dos circuitos Ladder [6]. O método Ladder foi bastante utilizado pelos especialistas em redes de distribuição. No final dos anos 80, com a modernização da legislação e o aumento da competitividade, bem como a necessidade de uma melhora da qualidade da energia elétrica fornecida, como decorrência do aparecimento de cargas sensíveis com a variação da tensão, o setor da distribuição passou a ser estudado de maneira mais intensa.

A proposta para resolver esse problema, feita por D. Rajjicic e A. Bose em 1987 utiliza o método Desacoplado Rápido, pois apresenta uma convergência rápida e eficiente, no entanto propõe uma modificação no método para compensar a alta relação entre a resistência e a reatância nas linhas (R/X), encontrada nos sistemas de distribuição, que provoca dificuldades na convergência para esses sistemas [7]. Com a continuidade das pesquisas, apresentou-se em 1988 um método de solução que além de poder tratar, de modo realista e eficiente às redes de distribuição com topologia radial também poderia ser empregado análise das redes radiais fracamente malhadas. Esta técnica era baseada no método Backward/Forward Sweep que foi desenvolvida por D. Shirmohammadi et al. em 1988, baseado na técnica Ladder proposta por W. H. Kerting [8]. O método

de resolução consiste em dois passos básicos, a varredura Backward, onde são calculados as correntes e fluxo das potências nas linhas, iniciando nas barras finais em direção da barra da subestação, e a varredura Forward, que realiza os cálculos das quedas de tensões com as atualizações das correntes ou fluxo de potência, que parte da barra da subestação em direção à barra final do alimentador [8]. Esses passos são repetidos até que se obtenha a convergência. Este método possui boas características de convergência e por ser muito robusto. Tornou-se o principal método de solução, servindo de base para muitos métodos propostos posteriormente. Este método também pode ser aplicado em redes de distribuição fracamente malhadas, ou seja, redes que possuem poucas interligações, onde são convertidas em radiais. Paralelamente, no ano de 1988, foi divulgado um novo método para solução do problema da análise do fluxo de potência em redes radiais de distribuição [9]. Esse algoritmo, bastante simples e eficiente, é constituído, basicamente, da aplicação de uma equação biquadrada, especialmente desenvolvida para a determinação das magnitudes das tensões nodais, em uma sequência de cálculos realizada a partir da barra fonte em direção às barras terminais. Seguida da somatória das potências nodais acumuladas em uma nova sequência de cálculos efetuada a partir das barras terminais em direção à barra fonte. Em 1989, M. E. Baran e F. F. Wu apresentaram o método baseado no método de Newton-Raphson, porém levando em consideração as características dos sistemas de distribuição, o que torna esse método exclusivo para sistemas radiais de energia elétrica [10]. O método propõe um novo modelo de equações para o cálculo de Fluxo de Potência, diferente, portanto, das equações de Fluxo de Potência para sistemas de transmissão. Essas equações são denominadas pelos autores de “Equações de Fluxo nos Ramos” ou então “Distflow”. Outra melhoria importante para a convergência do método é o uso de uma matriz de sensibilidade (jacobiana) modificada que atende a característica radial dos sistemas de distribuição.

No ano de 1990, R. Céspedes apresentou o método Soma de Potências, baseado no método Backward/Forward [11]. O método Soma de Potências tem, como característica básica, a possibilidade de transformar o problema de cálculo em um conjunto de subproblemas

que, por sua vez, podem ser resolvidos através das equações que relacionam as tensões entre dois nós de um alimentador de distribuição, com as potências equivalentes dos nós. Essa potência equivalente é a soma de todas as potências a jusante a esta barra, incluindo as perdas e são alocadas na posição correspondente a barra (carga equivalente), ou seja, calcula-se as cargas equivalentes para cada barra de carga. Este procedimento se dá no sentido das barras terminais para a subestação. Então partindo da barra da subestação, calculam-se as tensões do lado da carga para todas as barras. Com as novas tensões recalculam-se as perdas e com isso recalculam-se as novas cargas. Dessa forma, o processo de solução é realizado de dois em dois nós, e repetido até que a tensão em cada nó do sistema seja determinada e o erro se torne menor que uma tolerância especificada. Já em 1991, Tsai-Hsiang Chen et al. [12] apresentou um novo método em que utiliza uma aproximação do método Gauss Z_{bus} . É baseado no princípio da superposição aplicado às barras de tensão do sistema, ou seja, existem duas contribuições para o cálculo da tensão, uma proveniente da alimentação da subestação e a outra do equivalente de injeção de corrente. As cargas, capacitores e reatores são modelados como fontes equivalentes de injeções de corrente. Então o cálculo do fluxo de potência se baseia no método da superposição.

No método proposto em 1992, por S. K. Goswani e S. K. Basu [13], o processo de resolução é iniciado a partir da subestação considerando as "cargas equivalentes" da mesma forma que R. Cespedes [11] propôs. A diferença está na primeira iteração, onde não são levadas em conta as perdas das linhas, e também no equacionamento, já que neste método ele utiliza o fluxo de correntes nos ramos. A cada iteração então são encontradas novas perdas no sistema que são utilizadas no processo do método Soma de Potências. Em 1994, D. Rajicic et al. [14] propuseram um método que se baseia na ordenação e orientação da matriz impedância Z , junto com o método da Soma das Potências, porém o método se demonstra eficiente apenas para redes fracamente malhadas. No ano de 1995, C. S. Cheng e D. Shirmohammadi [15] apresentam um método para sistemas de distribuição trifásicos desequilibrados, também baseado no método Backward/forward Sweep, mas com diferenças no

equacionamento, pois para o cálculo das tensões utiliza a matriz impedância Z . No mesmo ano de 1995, R. D. Zimmerman e H. D. Chiang apresentam o método desacoplado rápido para sistemas de distribuição [16]. Este foi baseado na formulação proposta por M. E. Baran e F. F. Wu [10], mas com a diferença de utilizar o fluxo de corrente nos ramos ao invés de utilizar as potências como no método original. Utiliza uma matriz jacobiana aproximada, com isso consegue diminuir o tempo computacional, já que é necessária somente uma inversão da matriz.

O artigo de D. Das et al de 1995 [17] apresenta um novo método para resolver fluxo de potência nas redes de distribuição radiais baseado no método da soma de potências. O método proposto envolve só a avaliação de uma expressão algébrica das magnitudes de tensão e nenhuma função trigonométrica. A solução do problema de fluxo potência é feita por meio do cálculo iterativo dos módulos de tensão das barras, em função da potência ativa e reativa que circulam nos ramos. O critério de convergência está baseado na diferença, entre as perdas ativas e reativas em duas iterações subsequentes. O método proposto em 1996 por M. H. Haque pode ser aplicado a ambos os tipos de rede, radial e malhada [18]. Se a rede for malhada, é convertida a uma rede radial. Para o cálculo do fluxo de potência, utiliza o método de injeções de corrente nos pontos em que houve a abertura da malha, na rede radial equivalente e então é realizado cálculo através do método da matriz impedância reduzida, baseado no método proposto por T. H. Chen et al. [12]. O método proposto em 1997 por F. Zhang e C. S. Cheng [19] é baseado no método de Newton, modificado para atender as características dos sistemas de distribuição radiais. A matriz Jacobiana assume a forma UDU^T , onde U é uma matriz constante triangular superior que depende somente de topologia de sistema e “ D ” é um bloco matriz diagonal sendo o resultado da estrutura radial e propriedades especiais do sistema de distribuição. No processo iterativo é utilizado uma metodologia baseada no Backward/Forward Sweep, e o equacionamento do fluxo de carga é baseado no método da matriz impedância Z_{bus} . Os autores não explicitam a montagem da matriz jacobiana. O método proposto pode ser utilizado em outras aplicações, como na estimação de estado e

também pode ser estendido à solução de sistemas fracamente malhados, com geração distribuída e sistemas trifásicos (desequilibrado).

O método proposto por Y. H. Moon et al. em 1999 [20] é aplicado para solução de sistemas de distribuição radiais e malhados. Esse método também é baseado no método de Newton, mas diferentemente da formulação apresentada por F. Zhang e C. S. Cheng [19], que resolvem pela matriz impedância Z . Nesse trabalho utiliza-se a matriz admitância Y . A matriz Jacobiana, em sistemas monofásicos é dividida em duas matrizes, sendo que ambas são formadas por blocos (2x2). A primeira matriz é formada pelas partes real e imaginária da matriz admitância Y_{bus} do sistema e se mantém constante durante as iterações. Já a segunda matriz, é atualizada durante o processo iterativo. O vetor ΔI (variação da corrente) também é atualizado durante o processo iterativo. As tensões das barras do sistema são atualizadas até atingirem a convergência (ΔP e ΔQ forem menores ou iguais à tolerância estipulada). Em 1999, A. G. Expósito e E. R. Ramos apresentaram um método [21] para resolver o problema de fluxo de potência em redes radiais. O algoritmo apresentado segue uma aproximação diferente, apontada para aumentar a taxa de convergência. Está baseado na ideia intuitiva que quanto mais linear um sistema de equações melhor é sua taxa de convergência. Para alcançar esta meta, as equações de fluxo de carga foram escritas em termos de variáveis “alternativas” que conduzem a um conjunto de $3N$ equações ($2N$ equações lineares e N quadrático) para uma rede com $N+1$ barras. Um algoritmo computacional, baseado no método de Newton-Raphson é proposto para resolver o sistema de equação resultante.

O trabalho apresentado em 2000 por M. H. Haque calcula o fluxo de carga para sistemas de distribuição radiais ou fracamente malhados [22]. O sistema de distribuição é convertido primeiro em uma rede de fonte equivalente com configuração radial conforme artigo do autor [18], a diferença está no cálculo do fluxo de potência, que neste caso agora, é calculado utilizando as equações propostas em [10], equações “DistFlow”. As características do sistema original são preservadas injetando potência apropriada nos pontos em que foram

abertos os circuitos no sistema equivalente. As potências injetadas são calculadas e atualizadas durante o processo iterativo. O método proposto em 2000 por P. A. N. Garcia, et al. [23], baseado no método Newton-Raphson, chamado de “Método de Injeção de Corrente” é aplicado para soluções de sistemas trifásicos, com cargas desequilibradas, em que as equações das correntes injetadas são escritas em coordenadas retangulares e a matriz jacobiana é formada por blocos (6x6) e será aproximadamente igual à matriz admitância nodal, sendo esta variação determinada pelo modelo de carga adotado. A matriz jacobiana pode ou não ser atualizada durante o processo iterativo, visto que o número de iterações, sendo ela constante, é um pouco maior. No mesmo ano de 2000, S. Jovanovic e F. Milicevic [24] explora a topologia especial dos sistemas de distribuição para formular o método triangular de fluxo de carga de distribuição. Utiliza em sua formulação uma matriz triangular T, que é formada por $N_{ramos} \times N_{barras}$, constante durante o processo iterativo. Após a formulação da matriz calcula-se o fluxo de potência através de um processo baseado no Backward Sweep. A vantagem deste método é a simplicidade de sua formulação.

Em 2002 A. Augugliaro et al., apresentam um método de solução [25] para sistemas de distribuição, o método é válido tanto para sistemas radiais quanto para sistemas fracamente malhados. As tensões nas barras são consideradas como variáveis de estado. O método de solução é baseado no método iterativo Backward/Forward Sweep, modificado para aumentar a velocidade de convergência. O método proposto em 2003 por R. Ranjan e D. Das [26], para solução do fluxo de potência em sistemas radiais, é baseado no método proposto por D. Das et al. em [17] e no método proposto por M. E. Baran e F. F. em [19]. A vantagem do método proposto é que todos os dados são armazenados em forma de vetor, além de poder ser utilizado com o sistema *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) e *Distribution Automation and Control* (DAC).

Em 2003, B. Venkatesh e R. Ranjan [27] propõe um método de cálculo de fluxo de potência utilizando funções recursivas e uma estrutura de dados especializada, projetada para tirar vantagem da natureza radial de uma rede de distribuição. Esta estrutura de dado

pode ser facilmente atualizada para acomodar diferentes configurações. No geral, este método rápido, é flexível e computacionalmente eficiente, no entanto não foi concebido para lidar com geração distribuída. Também no ano de 2003, T. L. Baldwin e S. A. Lewis apresentam uma revisão dos métodos clássicos [28] e propõe uma nova metodologia, baseado no trabalho [24] de S. Jovanovic e F. Milicevic (2000) e no método Backward/Forward Sweep. Outra contribuição do método apresentado está na inclusão de múltiplas gerações, ou seja, não somente uma fonte (subestação) de alimentação. No ano de 2004, o artigo de R. Ciric et al. apresenta uma metodologia [29], baseada no método Backward/Forward Sweep, para cálculo de fluxo de potência de sistemas de distribuição com retorno pela terra.

Em 2006 o trabalho de A. Rost et. al. [30] apresenta uma metodologia para o cálculo de Fluxo de Potência em redes de distribuição radial com presença de geração distribuída através de funções recursivas e uma estrutura de dados especializada. O trabalho proposto em Min Dai et al. em 2008 [31] apresenta o problema do Fluxo de Potência em um inversor com aplicações em geração distribuída ligado à rede de distribuição. A solução de controle da potência ativa e reativa proposta possui como base em uma estratégia de controle da tensão existente no barramento. Um algoritmo baseado em laço de fase travada é desenvolvido como parte da solução para lidar com possíveis tensão da linha, grade harmônica distorcida e manter a corrente harmônica de linha livre. Em 2009 o artigo de Yong Xue et. al. [32] apresenta uma abordagem de controle de Fluxo de Potência de uma unidade de geração distribuída em uma rede de distribuição radial. O algoritmo proposto trabalha de maneira distinta a potência ativa da potência reativa sob controle em modo conectado à rede. O controle do Fluxo de Potência foi desenvolvido para controlar a potência ativa ajustando o ângulo de fase e o controle da potência reativa ajustando a tensão do capacitor de filtro. Apesar de não contribuir de maneira efetiva para a resolução do problema propriamente do Fluxo de Potência em redes de distribuição radial, este trabalho como o de A. Rost et. al. [30] e o de Min Dai et al. [31], trazem a existência da geração distribuída nas redes de distribuição radial.

Neste novo cenário das redes de distribuição radial, antes de se revolver o problema do Fluxo de Potência é necessário à modelagem adequada das unidades de geração distribuídas presente na rede de distribuição radial. Através de eletrônica de potência, sistemas de energia renováveis, como geradores de energia eólica e geradores fotovoltaicos são capazes de fornecer e absorver potência reativa e manter um o nível de Tensão especificado em um barramento. Essas propriedades permitem que tais sistemas modelados para ser modelado como um autocarro fotovoltaico durante o estado estacionário operação [33]. Em 2011 o artigo de YongLi Zhu et, al. [34] apresenta um algoritmo melhorado de Fluxo de Potência através do método de Newton Raphson em redes de distribuição considerando geração distribuída com base em suas estratégias de controle. Para diferentes tipos de geração distribuída são definidos tipos diferentes de estratégia de controle de tensão e potência ativa e reativa, onde são criados dois tipos de barramento, o PI e o PQ(V). Em 2012, o artigo de D. Bhujel et. al. [35] apresenta um algoritmo que também analisa o Fluxo de Potência em redes de distribuição radial com geração distribuída. É basicamente uma forma modificada do método de propagação Backward/Forward Sweep. Resumindo, o método proposto é uma forma modificada apresentada por D. Das et. al. [17] e D. Das et al. em [26]. Finalizando, em 2014 o artigo de Zeng Chengbi et. al. [36] apresenta um método para análise de Fluxo de Potência bidirecional com base em operações de sequência. Isso se deve ao fluxo estocástico produzido pela geração distribuída na rede de distribuição e pela alteração da carga na origem do eventual problema de sobrecarga. O método apresenta em seu primeiro momento uma serialização para descrever a variação aleatória da rede de distribuição radial que contém a geração distribuída, depois, um modelo de transição de estado faz uma avaliação dos riscos nas mudanças dos esforços de incertezas que levam tanto para o positivo e negativo dos ramos, e finalizando, o método toma uma decisão otimizando uma operação segura da rede de distribuição. Entre os anos de 2015 a 2018, nenhuma contribuição foi dada nesta área.

2.4 Método da Somatória de Potência (MSP)

Este método foi desenvolvido levando-se em conta os aspectos particulares envolvidos na análise de Fluxo de Potência em redes de distribuição radiais, inclusive o fato de tais redes apresentarem várias ramificações laterais. O método da Somatória de Potência é um algoritmo iterativo no qual, a cada iteração, é realizado o cálculo cumulativo das potências equivalentes em cada barra da rede, no sentido das barras terminais para a barra fonte, o qual é seguido dos cálculos das tensões em todas as barras da rede no sentido da barra fonte para as barras terminais, exceto para a barra fonte, cuja tensão é supostamente conhecida. Se não houver convergência, calculam-se as perdas nas linhas e realiza-se nova iteração. A seguir, estes procedimentos serão detalhadamente descritos. A partir das barras terminais, em direção à barra fonte, as potências equivalentes em cada nó k da rede elétrica são obtidas segundo Cespedes [11]:

$$P_K^{eq} = \sum P_j + P_K + \sum PL_{kj} \quad (1)$$

$$Q_K^{eq} = \sum Q_j + Q_K + \sum QL_{kj} + Q_K^{sh} \quad (2)$$

onde:

P_K^{eq} é a potência ativa equivalente no nó k .

$\sum P_j$ é a somatória das potências ativas equivalentes de todas as j barras imediatamente conectadas após a barra k .

P_K é a carga ativa da barra k .

$\sum PL_{kj}$ é a somatória das perdas de potência ativa nas linhas de interligação entre a barra k e as j barras imediatamente conectadas após a mesma.

Na equação (2), as parcelas tem o mesmo significado que na expressão (1), exceto que se referem a potências reativas. Ainda na expressão (2), Q_K^{sh} representa a potência reativa shunt injetada na barra k (caso exista), sendo que no caso de potência reativa capacitiva, Q_K^{sh} assume um valor negativo e no caso de potência reativa indutiva, Q_K^{sh} assume um valor positivo. Na primeira iteração, pode-se supor que as perdas nas linhas são nulas.

Após o cálculo das potências nodais, inicia-se o cálculo das tensões em cada nó, a partir do nó fonte em direção às barras

terminais da rede, sendo que a tensão no nó fonte é supostamente conhecida. As expressões utilizadas nestes cálculos são apresentadas a seguir: o módulo das tensões em cada barra j é obtido a partir da seguinte equação biquadrada:

$$A.V_j^4 + B.V_j^2 + C = 0 \quad (3)$$

Onde os seus coeficientes são definidos como:

$$A = G_{ij}^2 + B_{ij}^2 \quad (4)$$

$$B = 2.(P_j^{eq}.G_{ij} - Q_j^{eq}.B_{ij}) - y_{ij}.V_i^2 \quad (5)$$

$$C = (P_j^{eq})^2 + (Q_j^{eq})^2 \quad (6)$$

Fazendo-se:

$$D = V_j^2 \quad (7)$$

Tem-se a seguinte equação resolvente:

$$A.D^2 + B.D + C = 0 \quad (8)$$

Onde:

$$D = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4.A.C}}{2.A} \quad (9)$$

Em (9) toma-se apenas o sinal positivo. Agora, após a obtenção de “D”, a partir de (7) determina-se o valor de V_j :

$$V_j = \sqrt{D} \quad (10)$$

O ângulo de fase da tensão é determinado pela expressão:

$$\delta_j = \delta_i + \theta_{ij} + \tan^{-1} \left(\frac{Q_j^{eq} - B_{ij}.V_j^2}{P_j^{eq} + G_{ij}.V_j^2} \right) \quad (11)$$

Após o cálculo das tensões nodais, as mesmas podem ser utilizadas para calcular as perdas de potência nos ramos da rede, a partir da barra terminal em direção à barra fonte. Para um trecho com representação monofásica, entre uma barra i e uma barra j , tem-se:

$$PL_{ij} = |I_{ij}|^2 . r_{ij} = \left(\frac{|S_j^{eq}|}{V_j} \right)^2 . r_{ij} \quad (12)$$

$$QL_{ij} = |I_{ij}|^2 . x_{ij} = \left(\frac{|S_j^{eq}|}{V_j} \right)^2 . x_{ij} \quad (13)$$

onde:

PL_{ij} e QL_{ij} são as perdas de potência, respectivamente, ativa e reativa no trecho i - j .

I_{ij} é a corrente elétrica no trecho i - j .

r_{ij} e x_{ij} são os valores, respectivamente, da resistência e da reatância no trecho i-j.

A seguir, a Figura 1 proporcionar uma visualização global do método da Somatória de Potências, é apresentado o seu fluxograma simplificado.

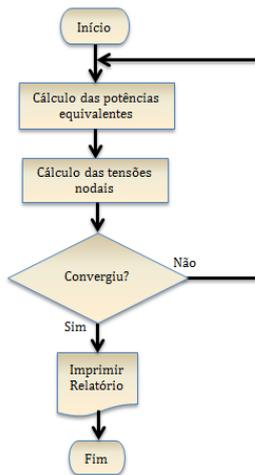


Figura 1 - Fluxograma do Método da Somatória das Potências. Fonte: Autores.

O critério de convergência será dado por:

$$|E_i^K - E_i^{K-1}| \leq \tau \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

onde:

E_i^K é o fasor de tensão atual em todas as 11 barras da rede, exceto a barra fonte.

E_i^{K-1} é o fasor de tensão em todas as 11 barras da rede (exceto a barra fonte), na iteração anterior.

τ é a tolerância especificada. Ao final de cada iteração, pode-se utilizar este critério de convergência.

2.5 Controle Coordenado de Tensão (CCT)

O controle de tensão é realizado tradicionalmente de forma manual. Entretanto, motivados pelas reestruturações das regras do setor elétrico em todo o mundo, os responsáveis pela operação dos SEP estão buscando sua evolução de forma a adaptar-se a este novo mundo [37]. Segundo Gomes, Martins e Santos [38] o tema controle

coordenado de tensão (CCT) vem a cada dia se tornando um estudo importantíssimo nos principais organismos que estudam e pesquisam sobre a estabilidade de tensão de sistemas elétricos. No Brasil, o ONS, o CEPEL e vários programas de pós-graduação de renomadas universidades tais como a PPGEE-UFPA e COPPE-UFRJ vêm desenvolvendo estudos e pesquisas nessa área, visando sua aplicação em áreas críticas do sistema brasileiro, sob o ponto de vista de controle e estabilidade de tensão. Nesses estudos foi mostrado que o controle de tensão está intimamente ligado a transferência de potência reativa, sendo assim, tomamos por conclusão que a regulação do nível de tensão na transmissão pode ser mais eficaz se existir uma automação entre os sistemas que controlam a repartição de potência reativa do sistema. Na Europa, várias concessionárias de energia elétrica estão adotando medidas e/ou estratégias para manter o perfil de tensão dentro dos limites aceitáveis em certas regiões do sistema para diferentes condições de carregamento [39]. Esta medida de regulação da tensão é chamada de Controle Coordenado de Tensão, cuja principal filosofia é dividir o sistema em áreas teoricamente desacopladas, de tal forma que as perturbações possam ser tratadas regionalmente por um conjunto de máquinas síncronas e dispositivos de controle, através da variação de suas referências de tensão e de seus fatores de participação de geração de potência reativa [40].

O Controle Coordenado de Tensão (CCT) ocorre em três níveis hierárquicos: primário, secundário e terciário. Além de coordenado, este controle também é realizado utilizando dados de tempo real e de forma descentralizada, uma vez que o sistema elétrico em questão é dividido em subáreas; cada área possui seus controles primário e secundário, ficando para o terciário a responsabilidade de realizar a coordenação entre as subáreas. A seguir são explicados cada um dos níveis de hierarquia citados.

Segundo Gomes, Martins e Santos [37], a Figura 2 apresenta um modelo de controle coordenado de tensão. Nesta figura V_p representa o valor da tensão do barramento (ou barra) “Piloto”; V_{popt} é o valor ótimo calculado pelo CTT para o V_p ; V_{Ref} é o valor de referência de tensão das unidades geradoras fornecidas ao CPT (PVC) pelo CST (SVC) para que V_p seja igual a V_{popt} ; V_t é o valor de tensão do

barramento terminal das unidades geradoras e E_{fd} é o valor de tensão fornecida pelo CPT às unidades geradoras para que V_t seja igual a V_{Ref} .

A hierarquia do controle coordenado de tensão apresenta uma certa independência entre os três níveis, devido às diferentes escalas de tempo de atuação de cada um, e às regiões em que atuam. Isso garante a ausência de riscos de oscilação e instabilidade por ações de controle conflitantes [41].

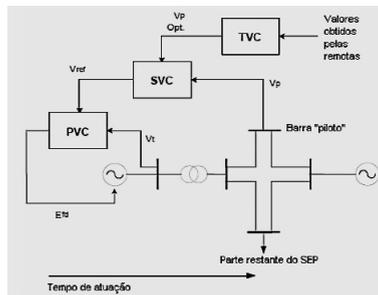


Figura 2 - Modelo de Controle Coordenado de Tensão.

O Controle Primário de Tensão (*Primary Voltage Control* - PVC) atua com a resolução temporal de segundos e é realizado pelos controladores automáticos de tensão presentes nas unidades geradoras, compensadores síncronos e estáticos. Cada controlador é responsável por manter a tensão de um barramento de uma subárea em um valor pré-determinado. Este nível de controle compensa as rápidas variações que ocorrem nestas tensões. Segundo Pavão [41], o controle primário de tensão é o mais antigo e comum em todos os sistemas elétricos de potência. Sua principal função é manter a tensão terminal dos equipamentos envolvidos no seu valor de referência. Todos os equipamentos responsáveis pelo controle primário de tensão são totalmente automatizados e atuam baseados em desvios de operação no sistema, causados geralmente por variações de carga e/ou contingências.

O CPT é subdividido em controle do gerador e controle da usina. O controle do gerador consiste, basicamente, da atuação do regulador automático de tensão (RAT). Esses reguladores atuam na

excitatriz da máquina síncrona, a qual fornece tensão e conseqüentemente corrente aos enrolamentos de campo da máquina, podendo assim controlar a tensão terminal da mesma. Já o controle da usina, geralmente conhecido como Controle Conjunto de Tensão - CCJT, *Joint Voltage Control - JVC*, tem como objetivo manter o lado de alta tensão do transformador elevador igual a valores especificados, evitando assim intercâmbio de potência reativa entre os geradores da usina [41].

O Controle Secundário de Tensão (*Secondary Voltage Control - SVC*), atua com a resolução temporal de minutos e realimenta os PVC de sua subárea, atualizando os valores de referência de tensão dos barramentos e atuando nos equipamentos de resposta mais lenta, como tapes de transformadores. Este nível de controle tem como objetivo o controle da tensão de barramento “Piloto” previamente definida, além de otimizar a potência reativa das unidades geradoras. Este nível de controle também compensa as variações de tensão mais lentas. O controle secundário de tensão consiste de uma malha mais externa que regula a tensão do lado da transmissão, cujos principais objetivos são a manutenção do perfil de tensão do sistema, a racionalização das reservas de reativos, a diminuição do fluxo de reativos, e a diminuição das perdas, contribuindo para uma operação mais segura e econômica do sistema [41].

O controle é realizado através do ajuste das tensões de referência do RAT, compensadores síncronos ou estáticos, transformadores de tape variável, entre outros [41]. A principal filosofia do CST é a divisão do sistema em áreas teoricamente desacopladas do ponto de vista da tensão, onde cada área é regulada por um conjunto de máquinas e dispositivos de controle específicos, os quais têm por função manter a tensão de uma determinada barra da área em um valor de referência. Esta barra é denominada barra piloto, que caracteriza o comportamento da tensão de uma determinada área, fornecendo a informação necessária para a tomada de ações de controle [41]. O Task Force do CIGRE sobre Controle Secundário de Tensão apresenta uma metodologia baseada na suposição de que as barras piloto devem ser escolhidas através das

barras com maior potência de curto-circuito, pois são estas barras que impõem o valor de tensão às barras eletricamente próximas.

Além da escolha da barra piloto, outros parâmetros também devem ser determinados, como: o valor de referência de tensão do CST, os fatores de repartição de potência reativa de cada máquina, os ganhos das malhas de controle. O tempo de atuação do CST está na faixa de minutos, dependendo do esquema adotado e do grau de automação. Ainda segundo Pavão [41], a Figura 3 apresenta o diagrama de blocos de uma malha de controle secundário de tensão padrão.

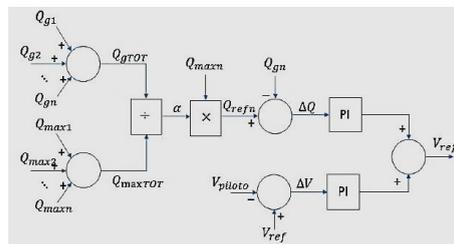


Figura 3 - Diagrama de blocos da malha de controle secundário de tensão.

Onde: $Q_{g1}, Q_{g2}, \dots, Q_{gn}$ – potência reativa gerada pelas máquinas 1, 2, ..., n;
 $Q_{max1}, Q_{max2}, \dots, Q_{maxn}$ – potência máxima gerada pelas máquinas 1, 2, ..., n;
 V_{piloto} – tensão da barra piloto;
 V_{ref} – tensão de referência fornecida pelo CTT.

A malha do controle secundário de tensão é composta por duas malhas de controle: (1ª) Malha de Controle de Tensão: realiza a comparação do valor do módulo da tensão da barra piloto com a referência fornecida pelo Controle Terciário de Tensão (CTT), gerando um sinal de erro que é tratado por um controlador proporcional – integral e posteriormente somado ao erro de potência reativa proveniente da malha de potência reativa. Seu objetivo é manter a tensão da barra piloto no seu valor de referência, e; (2ª) Malha de Controle de Potência Reativa: realiza a coordenação das reservas de potência reativa da área através do cálculo do fator de participação “ α ”, que é calculado para que todas as máquinas síncronas, pertencentes a uma mesma área de controle, de maneira a fornecer potência reativa ao sistema

proporcionalmente à sua capacidade nominal. Segundo Pavão [41], a Figura 4 mostra o diagrama de blocos do regulador de tensão de uma unidade geradora síncrona com a malha de controle de tensão da barra escolhida como barra piloto.

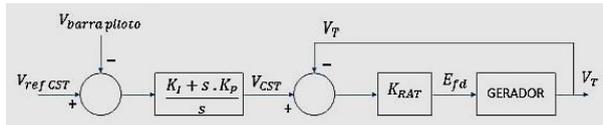


Figura 4 - Malha de Controle da Tensão da Barra Piloto.

Pela malha de controle da Figura 4 verifica-se que é feita uma comparação entre a tensão da barra piloto $V_{barrapiloto}$ e a tensão de referência fornecida pelo controle secundário de tensão V_{refCST} , gerando um sinal que é tratado por um controle proporcional-integral (PI), que por sua vez, é comparado com a tensão da barra geradora V_T , fornecendo um sinal de erro que servirá de referência para o RAT. Assim, é fornecida a tensão de campo E_{fd} para o gerador. A finalidade desta malha é manter a tensão da barra piloto no seu valor de referência.

A malha de controle de repartição de reativo pode ser visualizada na Figura 5, segundo Pavão [41]. Essa malha tem a função de realizar a coordenação das reservas reativas da área através do fator de participação “ α ”, onde $\sum \alpha_i = 1$ em p.u., fazendo com que cada unidade geradora forneça potência reativa na proporção da sua capacidade. Então, a soma de toda a potência reativa gerada é particionada pelo fator de participação de cada máquina representado por α_i , o sinal então é comparado com a potência reativa gerada pela máquina “ i ”, gerando um erro que é tratado por um PI resultando no sinal de compartilhamento de reativo V_{shri} . A ação em conjunto dessas duas malhas de controle são as responsáveis pelo controle de tensão e repartição de potência reativa do CST. A Figura 6 mostra o diagrama de blocos da modelagem e da ação em conjunto das duas malhas, no qual duas unidades geradoras síncronas participam do controle secundário de tensão. Cada unidade participante do CST recebe o mesmo sinal de V_{CST} (sinal responsável pelo controle de tensão), enquanto que o sinal V_{shr} (sinal responsável pela repartição de

reativo) é dividido de acordo com o fator de partição “ α ”. Alguns parâmetros são necessários às malhas de controle, como os fatores de partição de reativos, valor de tensão de referência do CST e os ganhos das malhas [43].

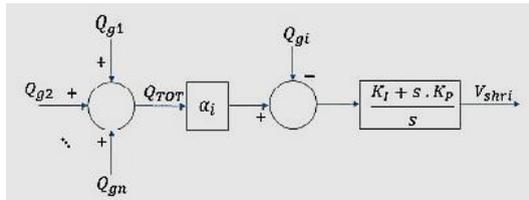


Figura 5 - Malha de Controle de Repartição de Reativo.

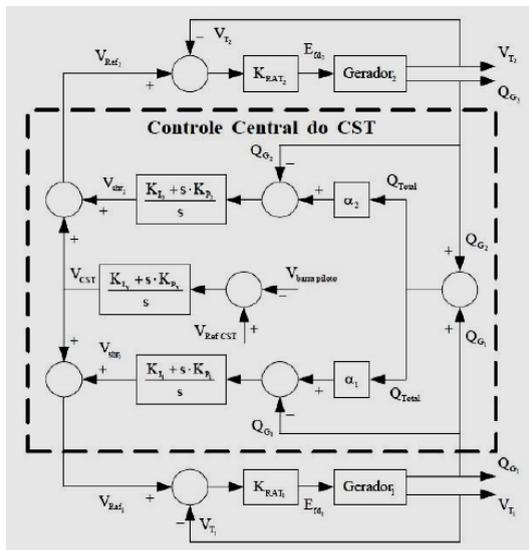


Figura 6 - Malha do Controle Secundário de Tensão.

Apesar da eficácia do controle secundário de tensão aplicado em algumas áreas, conforme apresentado em algumas literaturas, existem algumas limitações, sendo as principais listadas a seguir [44]:

- Em algumas regiões, com o desenvolvimento e crescimentos dos sistemas elétricos, o acoplamento entre as áreas teoricamente independentes aumentou após a implementação do CST. Isso faz com que as áreas de controle se tornem cada

vez mais acopladas, gerando ações conflitantes que geram certa degradação na resposta dinâmica do sistema, aumentando o risco de problemas relacionados a instabilidade de tensão;

- A equalização das reservas reativas de uma mesma área, através do alinhamento das unidades de geração controlada, é um fator desestabilizante que pode aumentar os distúrbios nos primeiros instantes após a ocorrência de certas contingências, e;
- Em relação à malha de controle, existem os limites tanto de potência reativa, quanto os de tensão, sendo estes últimos negligenciados.

Os parâmetros das malhas de controle são fixos, não permitindo mudanças para diferentes condições de operação. A verificação dessas limitações na análise do controle secundário de tensão em sistemas elétricos com a inserção de parques eólicos é de extrema importância para um resultado consistente. Outro fator bastante influente é a escolha da barra piloto, pois todas as informações das malhas de controle são feitas baseadas nas informações desta barra [39].

A barra piloto é uma barra de carga na qual a tensão é medida em tempo real e usada para decisões das ações de controle [45]. Num sistema elétrico, o número de barras de carga é muito maior que o número de barras pilotos, assim faz-se necessário um método adequado para selecionar adequadamente as barras cujas informações são suficientes para controlar o perfil de tensão do sistema. Com base na tensão destas barras são determinadas as tensões de referências para os diversos equipamentos de controle de tensão sob ação do controle secundário. Em 1989, a primeira metodologia proposta para a divisão de áreas e seleção da barra piloto é descrita em Lagonotte [46], sendo usada pela EdF (Electricité de France) na França. Esta metodologia consistia na formação de uma lista de barras candidatas a barra piloto, no qual o critério de seleção era a potência de curto-circuito de cada barra. Mas com o desenvolvimento do sistema elétrico francês na década de 80, este método tornou-se ineficaz, devido ao aumento do acoplamento entre áreas do sistema. Foi proposto, então,

um novo método baseado na distância elétrica entre as barras do sistema elétrico. Com as áreas de controle determinadas, a barra piloto de cada área é selecionada a partir da determinação da barra eletricamente mais próxima do centro elétrico da área correspondente. Segundo o CIGRE Task Force sobre Controle Secundário de Tensão é apresentada uma metodologia baseada na suposição de que as barras piloto devem ser escolhidas através das barras com maior potência de curto-circuito, pois são estas barras que impõem o valor de tensão às barras eletricamente próximas. Neste trabalho, a barra piloto do sistema elétrico foi escolhida tendo como base uma barra de carga em que suas variações de tensão acompanham as variações de tensão das outras barras da área.

O Controle Terciário de Tensão (*Tertiary Voltage Control - TVC*), é o último nível na hierarquia e realimenta os SVC de todas as subáreas, assegurando que o controle está sendo realizado de forma segura e econômica, garantindo a otimização do controle. O TVC executa um fluxo de potência ótimo a cada quinze minutos ou por solicitação do operador (após ocorrência de uma alteração do SEP). O CTT é o nível de coordenação mais lento, no qual a reserva disponível de geração de potência reativa é otimizada para manter um perfil de tensão adequado [47]. Segundo Corsi et al. [48], o Controle Terciário é responsável pela otimização do perfil de tensão do sistema, através da variação das tensões de referência das barras piloto e dos fatores de participação dos geradores participantes do controle secundário, garantindo segurança e economia operativa. Para isto, normalmente é usado um fluxo de carga ótimo. Segundo Corsi [48], a Figura 7 mostra a estrutura hierárquica de controle do Controle Coordenado de Tensão.

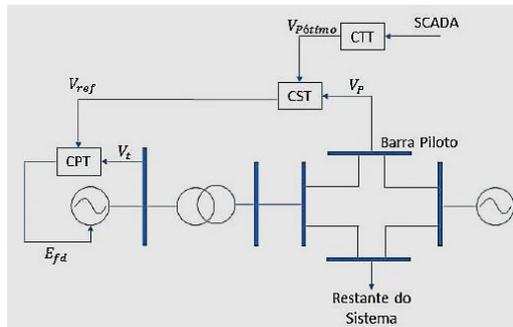


Figura 7 - Estrutura hierárquica do Controle Coordenado de Tensão.

O processo de regulação do perfil de tensão de determinada área do sistema é realizado a partir do CTT que recebe informações de um sistema de supervisão, controle e aquisição de dados (*Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA*), e um fluxo de potência ótimo, que por sua vez envia uma tensão de referência ($V_{p \text{ ótimo}}$) a ser utilizada pelo CST. Então, o CST compara esta tensão de referência com a tensão da barra piloto, resultando em um erro (V_{ref}). Este sinal serve de referência para o CPT, que o compara com a tensão terminal da barra geradora, atuando na excitação da máquina, para fornecer potência reativa para o sistema. Os principais esquemas de controle terciário de tensão efetivamente implantados e em operação são os esquemas italiano, francês e belga [47].

3. NOVA FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA

Foram criados cinco cenários para testes, os quais serão simulados no programa computacional aqui proposto, sendo três cenários de cinco, nove e trinta e quatro barras sem geração distribuída (GD), e duas redes de distribuição radial com GD. A GD definida e incluída nas simulações foi um gerador fotovoltaico de 750 kWp, integrado diretamente na barra de média tensão, em 6,9 kV. Os tipos de cabos e seus comprimentos, barramentos, tipos de barras e outras especificações foram definidas conforme se encontra na literatura. Mudança somente na potência de geração na barra 0 (referência) e na

barra que é ligada a GD. Para as informações em p.u. toma-se a potência de base igual a $S = 100 \text{ MW}$. O programa inicia solicitando o nome do arquivo de entrada da rede de distribuição. Este arquivo de extensão *.dat* e contém os dados sobre: barramentos, frequência, potência base, barramentos, trechos, cargas, elementos shunt, características técnicas dos cabos usados e qual barra que possui GD. Depois é solicitado um nome para o arquivo de saída. O programa é dividido em duas partes: (i) o arquivo executável *main.c* e (ii) o arquivo *psm.c*, onde o primeiro efetuar a leitura do arquivo, e faz o gerenciamento de todos os cálculos e imprime os resultados, e o segundo, faz os cálculos das tensões e das potências ativas e reativas, partindo da barra 0 até a última barra, bem como, da última barra para a barra 0, até que os resultados converjam. O erro admissível definido foi de 0,0001.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Tabela 1 – Resultados obtidos pela ferramenta de cálculo de Fluxo de Potência para uma rede de distribuição com cinco barras sem GD.

Barra	Nome da Barra	Tensão (pu)	Pot. Ativa (kW)	Pot. Reativa (kVAr)
0	10	1,0000	2953,83	1840,62
1	20	0,9401	2837,51	1629,03
2	30	0,9203	1919,10	1086,63
3	40	0,9132	609,00	345,14
4	50	0,9222	870,00	493,05

Fonte: Autores.

Tabela 2 – Resultados obtidos pela ferramenta de cálculo de Fluxo de Potência para uma rede de distribuição com nove barras sem GD.

Barra	Nome da Barra	Tensão (pu)	Pot. Ativa (kW)	Pot. Reativa (kVAr)
0	10	1,0000	5234,93	2118,09
1	20	0,8955	4872,34	2558,30
2	30	0,8643	2834,34	1614,27
3	40	0,8455	1493,27	860,50
4	50	0,8316	609,00	345,14
5	60	0,8354	870,00	493,05
6	70	0,8770	1923,24	813,20
7	80	0,8714	380,77	170,77
8	90	0,8695	147,34	91,73

Fonte: Autores.

Weverson dos Santos CIRINO, Daniel Guzmán Del RIO, Ubiratan Holanda BEZERRA–
Ferramenta Computacional para o Cálculo de Fluxo de Potência: Uma Nova Abordagem em Rede de Distribuição de Energia Elétrica Radial Fracamente Malhada com Geração Distribuída (GD) e Conrole Coordenado de Tensão (CCT)

Tabela 3 – Resultados obtidos pela ferramenta de cálculo de Fluxo de Potência para uma rede de distribuição com trinta e quatro barras sem GD.

Barra	Nome da Barra	Tensão (pu)	Pot. Ativa (kW)	Pot. Reativa (kVAr)
0	10	1,0000	13595,11	3851,93
1	20	1,0000	13595,11	3851,93
2	30	1,0000	13595,11	3851,93
3	40	1,0000	13595,11	3851,93
4	50	0,8947	1305,00	739,58
5	60	0,7434	10654,44	3109,29
6	70	1,0000	9218,24	3106,51
7	80	0,7434	7782,03	2755,81
8	90	1,0000	5736,83	1843,12
9	100	0,6901	3745,29	352,19
10	110	0,9545	886,70	1282,70
11	120	1,0000	2689,15	273,31
12	130	0,9215	622,12	78,82
13	140	0,9368	233,18	641,55
14	150	0,8412	1540,04	273,26
15	160	0,8887	595,61	181,50
16	170	0,8641	433,83	145,69
17	180	0,8445	339,42	35,79
18	190	0,8571	84,28	145,68
19	200	0,8249	330,09	29,45
20	210	0,8226	56,13	116,21
21	220	0,8087	267,42	29,45
22	230	0,8203	55,93	70,66
23	240	0,8004	135,74	45,55
24	250	0,7973	127,85	56,93
25	260	0,7943	99,39	13,72
26	270	0,7983	35,22	56,93
27	280	0,7882	98,38	13,72
28	290	0,7961	35,12	11,68
29	300	0,7864	29,82	45,25
30	310	0,7840	67,95	13,72
31	320	0,7940	35,01	11,68
32	330	0,7845	29,73	13,73
33	340	0,7918	34,90	12,59

Fonte: Autores.

Tabela 4 – Resultados obtidos pela ferramenta de cálculo de Fluxo de Potência para uma rede de distribuição com cinco barras com GD.

Barra	Nome da Barra	Tensão (pu)	Pot. Ativa (kW)	Pot. Reativa (kVAr)
0	10	1,0000	3153,43	2062,66
1	20	0,9343	3017,08	1814,61
2	30	0,8481	1920,02	1087,01
3	40	0,8404	609,00	345,14
4	50	0,8570	870,00	493,05

Fonte: Autores.

Tabela 5 – Resultados obtidos pela ferramenta de cálculo de Fluxo de Potência para uma rede de distribuição com nove barras com GD.

Barra	Nome da Barra	Tensão (pu)	Pot. Ativa (kW)	Pot. Reativa (kVAr)
0	10	1,0000	5245,43	3226,01
1	20	0,8953	4881,29	2563,41
2	30	0,8641	2834,67	1614,29
3	40	0,8452	1493,28	860,52
4	50	0,8313	609,00	345,14
5	60	0,8351	870,00	493,05
6	70	0,8766	1931,82	817,80
7	80	0,8845	381,60	345,86
8	90	0,8715	147,34	256,04

Fonte: Autores.

5. CONCLUSÃO

Depois das iterações para cada sistema elétrico proposto obtém-se os arquivos de saídas, ou seja, os resultados encontrados pela aplicação do programa computacional elaborado em linguagem C++ para o cálculo de fluxo de potência, para isso, foram calculadas a tensão nodal e suas potências ativa e reativa nas barras das cinco redes de distribuição de energia elétrica em estudo. Aqui pode-se afirmar que o programa funcionou adequadamente. É importante ressaltar que estes resultados foram obtidos através do Método da Somatória de Potência, método este, pouco utilizado nos programas atualmente existentes.

O reconhecimento por parte do software da geração distribuída (GD) inclusa nas 02 redes de distribuição propostas para o estudo, demonstra que o software utilizou seus dados de maneira eficaz para o cálculo de fluxo de carga dessas redes. O controle coordenado de tensão estabelecido foi o primário através do Controle Automático de Tensão (CAT). Outro ponto positivo do programa elaborado é a sua escrita aberta, a qual pode ser utilizada nos cursos de graduação e pós-graduação em engenharia elétrica nas subáreas de sistemas elétricos de potência e proteção de sistemas elétricos.

Analizando os resultados obtidos para as três redes de distribuição radiais sem GD, observou-se que seus resultados em comparação com resultados retirados de softwares/programas, tais como: ANAREDE, Powerworld e Matpower, obtive-se erro absoluto foi de 0,05, e desvio padrão de 0,038. Já para as duas 02 redes de

distribuição propostas com GD, a magnitude do erro absoluto foi de 0,33, e o desvio padrão foi de 0,78. Dessa forma conclui-se que o programa elaborado em linguagem C++ para calcular o fluxo de potência em redes de distribuição radiais e fracamente malhada, com e sem GD, através do método das somatórias de potência e com CCT-p, funcionou de forma satisfatória, entretanto, necessita de algumas melhorias e aperfeiçoamentos em seu código para reduzir o erro absoluto e apresentação dos seus resultados.

AGRADECIMENTOS

Venho agradecer primeiramente a Deus, pelo seu cuidado com minha saúde neste cenário mundial pandêmico de COVID-19. Ao meu professor orientador do programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra. A Universidade do Estado do Amazonas e ao Grupo de Pesquisa NEPEDDE-UEA, ao qual faço parte. A minha família, Cláudia, Larissa e Letícia, e a todos que me ajudaram neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] (GLIMN & STAGG, 1957), A. GLIMN and G. STAGG, Automatic calculation of load-flow, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, PAS-76, pp. 817 - 825, 1975.
- [2] (GLIMN & STAGG, 1957), A. GLIMN and G. STAGG, Automatic calculation of load-flow, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, PAS-76, pp. 817 - 825, 1975.
- [3] (BERG, HAWKINS & PLEINES, 1967), R. BERG JR., E. S. HAWKINS and W. W. PLEINES, Mechanized Calculation of Unbalanced Load Flow on Radial Distribution Circuits, IEEE Transactions PAS, Vol. 86, No. 4, April 1967, pp. 415 - 421.
- [4] (DICKSON, 1973), W. D. DICKSON, Computer Simulation for Rural Electric Distribution Systems, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Arlington, May, 1973.
- [5] (STOTT & ALSAÇ, 1974), B. STOTT and O. ALSAÇ, Fast decoupled load flow, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-93, pp. 859 - 869, May/June 1974.
- [6] (KERSTING & MENDIVE, 1976), W. H. KERSTING and D. L. MENDIVE, An Application of Ladder Network Theory to the Solution of Three-Phase Radial Load-Flow Problems, IEEE PES Winter Meeting, New York, January, 1976, IEEE Paper No. A 76 044-8.
- [7] (RAJICIC & BOSE, 1987), D. RAJICID and A. ROSE, A modification to the fast decoupled powerflow for networks high R/X ratios, Power Industry Computer Application Conference 1989, Conference Papers, 1987.
- [8] (SHIRMOHAMMADI, HONG, SEMLYEN & LUO, 1988), D. SHIRMOHAMMADI, H. W. HONG, A. SEMLYEN and G. X. LUO, A Compensation-Based Power Flow Methodfor Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May, 1988, pp. 753-762.
- [9] (SHIRMOHAMMADI, HONG, SEMLYEN & LUO, 1988), D. SHIRMOHAMMADI, H. W. HONG, A. SEMLYEN and G. X. LUO, A Compensation-Based Power Flow Methodfor Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May, 1988, pp. 753-762.

Weverson dos Santos CIRINO, Daniel Guzmán Del RIO, Ubiratan Holanda BEZERRA–
**Ferramenta Computacional para o Cálculo de Fluxo de Potência: Uma Nova
Abordagem em Rede de Distribuição de Energia Elétrica Radial Fracamente
Malhada com Geração Distribuída (GD) e Conrole Coordenado de Tensão
(CCT)**

- [10] (BARAN & WU, 1989), M. E. BARAN and F. F. WU, Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, *IEEE Trans. Power Research Delivery*, vol. 4, No. 02, April 1989.
- [11] (CESPEDES, 1990), R. CESPEDES, New method for the analysis of distribution Networks, *IEEE trans. on Power Delivery*, vol. 05, No. 01, January, 1990.
- [12] (CHEN, CHEN, HWANG, KOTAS & CHEBLI, 1991), T. H. CHEN, M. S. CHEN, K. J. HWANG, P. KOTAS and E. A. CHEBLI, Distribution system power flow analysis-a rigid approach, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 6, pp. 1146-1152, July, 1991.
- [13] (GOSWANI & BASU, 1992), S. K. GOSWANI and S. K. BASU, A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, No. 03, pp. 1484-1491, July, 1992.
- [14] (RAJICIC, ACKOVSHI & TALESKI, 1994), D. RAJICIC, R. ACKOVSHI and R. TALESKI, Voltage correction power flow, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 09, No. 02, pp. 1056-1062, April, 1994.
- [15] (CHENG & SHIRMOHAMMADI, 1995), C. S. CHENG and D. SHIRMOHAMMADI, A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis, *IEEE Transactions Power System*, vol. 10, pp. 671-679, may, 1995.
- [16] (ZIMMERMAN & CHIANG, 1995), R. D. ZIMMERMAN and H. D. CHIANG, Fast decoupled power flow for unbalanced radial distribution systems, *IEEE/PES 1995 Winter Meeting*, New York, NY, January 1995, 95 WM 219-6 PWRSA 76 044-8.
- [17] (DAS, KOTHARI & KALAM, 1995), D. DAS, D. P. KOTHARI and A. KALAM, Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks, *Electric Power & Energy Systems*, vol. 17, No. 05, October 1995, pp. 335-346.
- [18] (HAQUE, 1996), M. H. HAQUE, Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration, *IEE Proc. – Gener. Trasm. Distrib.*, vol. 143, No. 01, January 1996, pp. 33-38.
- [19] (ZHANG & CHENG, 1997), F. ZHANG and C. S. CHENG, A modified newton method for radial distribution system power flow analysis, *IEEE Trans. Power Research Delivery*, vol. 12, No. 01, February 1997.
- [20] (MOON, CHOI, CHO, KIM; HA, BOK-NAM & LEE, 1999), YOUNG-HYON MOON, BYOUNG-KON CHOI, BYOUNG-HOON CHO, SE-HO KIM, HA BOK-NAM and JUNG-HO LEE, Fast and reliable distribution system load flow algorithm based on the Y bus formulation, *Power Engineering Society Summer Meeting*, 1999. *IEEE* vol. 01, pp. 238-242, 18-22 July 1999.
- [21] (EXPÓSITO & RAMOS, 1999), A. G. EXPÓSITO and E. R. RAMOS, Reliable load flow technique for radial distribution networks, *PESWinter Meeting*, Paper 344-PWRS-0-12-96, 1999.
- [22] (HAQUE, 2000), M. H. HAQUE, A general load flow method for distribution systems, *Electric Power Systems Research* 54 (2000), pp. 47-54.
- [23] (GARCIA, PEREIRA, CARNEIRO, DA COSTA & MARTINS, 2000), P. A. N. GARCIA, J. L. R. PEREIRA, S. JR. CARNEIRO, V. M. DA COSTA and N. MARTINS. Three-phase power flow calculations using the current injection method, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, Issue 2, May 2000, pp. 508 - 514.
- [24] (JOVANOIC & MILICEVIC, 2000), S. JOVANOIC and F. MILICEVIC. Triangular distribution load flow, *IEEE Power Engineering Review*, vol. 20, pp 60 - 62, May 2000.
- [25] (AUGUGLIARO, DUSONCHET, IPPOLITO & SANSEVERINO, 2002), A. AUGUGLIARO, L. DUSONCHET, M. G. IPPOLITO and E. R. SANSEVERINO, An efficient iterative method for load-flow solution in radial distribution networks, *Power Tech Proceedings*, 2002, *IEEE Porto*, vol. 03, 10 - 13 Sept. 2001.
- [26] (RAJAN & DAS, 2003), R. RANJAN and D. DAS, Simple and efficient computer algorithm to solve radial distribution networks, *Electric Power Components and systems*, 31: 95 - 107, 2003.
- [27] (VENKATESH & RANJAN, 2003), B. VENKATESH and R. RANJAN, Data structure for radial distribution load flow analysis, *IEE Proc. in Gen., Trans. and Dist*, 150, (1), pp. 101 - 106, January 2003.

Weverson dos Santos CIRINO, Daniel Guzmán Del RIO, Ubiratan Holanda BEZERRA–
**Ferramenta Computacional para o Cálculo de Fluxo de Potência: Uma Nova
Abordagem em Rede de Distribuição de Energia Elétrica Radial Fracamente
Malhada com Geração Distribuída (GD) e Conrole Coordenado de Tensão
(CCT)**

- [28] (BALDWIN & LEWIS, 2004), T. L. BALDWIN and S. A. LEWIS, Distribution load flow methods for shipboard power systems, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, Issue 5, Sept-Oct 2004, pp. 1183 - 1190.
- [29] (CIRIC, OCHOA & PADILHA, 2004), R. CIRIC, L. F. OCHOA and A. PADILHA, Power flow in distribution networks with Earth return, International journal of electrical power & energy systems. Vol. 26, no. 05, pp. 373 - 389, 2004.
- [30] (ROST, VENKATESH & DIDUCH, 2006), A. ROST, B. VENKATESH and C. P. DIDUCH, Distribution system with distributed generation load flow, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 06, Issue 2, 2006.
- [31] (DAI, MARWALI, JUNG & KEYHANI, 2008), M. DAI, M. N. MARWALI, J. JUNG and A. KEYHANI, Power flow control of a single distributed generation unit, IEEE Transactions on power electronics, Vol. 23, No. 01, January 2008.
- [32] (XUE, DENG & MA, 2009), Y. XUE, J. DENG and S. MA, Power flow control of a distributed generation unit in micro-grid, IEEE IPEMC 2009, Vol. 09, 2009, pp. 2122 - 2125.
- [33] (XUE, DENG & MA, 2009), Y. XUE, J. DENG and S. MA, Power flow control of a distributed generation unit in micro-grid, IEEE IPEMC 2009, Vol. 09, 2009, pp. 2122 - 2125.
- [34] (BHUJEL, ADHIKARY & MISHRA, 2012), D. BHUJEL, B. ADHIKARY and A. K. MISHRA, A load flow algorithm for radial distribution system with distributed generation, IEEE ICSET 2012, Nepal, pp. 375 - 380.
- [35] (CHENGBI, XIAOHAO, WENWEN, HONG & YAOYUAN, 2014), Z. CHENGBI, L. XIAOHAO, F. WENWEN, M. HONG and L. YAOYUAN, Power flow analysis of distribution network containing distributed generation based on sequence operation, 2014 International Conference on Power System Technology - POWERCON 2014 - Chengdu, 20 - 22 Oct. 2014
- [36] (TARANTO, MARQUES & FALCÃO, 2002), G. N. TARANTO, A. B. MARQUES and D. M. FALCÃO, Coordinated Voltage Control Using Fuzzy Logic. Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 03, 2002, pp. 1314 - 1317.
- [37] (GOMES, MARTINS & SANTOS, 2002), C. B. GOMES, N. MARTINS e M. G. SANTOS, Estudos Preliminares da Aplicação de Controle Coordenado de Tensão na Área Rio. VII EDAO, 01-PU/02, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 10 a 14 de março de 2002.
- [38] (TARANTO, MARTINS, FALCÃO, MARTINS & SANTOS, 2000), G. N. TATANTO, N. MARTINS, D. M. FALCÃO, A. C. B. MARTINS and M. G. SANTOS, Benefits of applying secondary voltage control schemes to the Brazilian system, Proc. of the IEEE/PES Summer Meeting, Seattle, USA, July 2000, pp. 937 - 941.
- [39] (PAUL, LÉOST & TESSERON, 1987), J. P. PAUL, J. Y. LÉOST and J. M. TESSERON, Survey of the secondary voltage control in France: Present realization and investigations, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 2, N° 02, pp. 505 - 511, May 1987.
- [40] (GOMES, 2001), C. B. GOMES, Implementação de Funções Utilizadas no Controle Coordenado de Tensão num Simulador Rápido. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2001.
- [41] (PAVÃO, 2006), R. K. PAVÃO, Avaliação de Uma Estratégia de Controle Secundário de Tensão Utilizando Seleção de Barras Piloto e Áreas de Controle Através de Lógica Fuzzy. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2006.
- [42] (ALMEIDA, 2004), L. P. ALMEIDA, Análise de Desempenho do Controle Automático de Geração e do Controle Secundário de Tensão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004.
- [43] (LEFEBVRE, FRAGNER, BOUSSION, MALLET & BULLOT, 2000), H. LEFEBVRE, D. FRAGNIER, J. Y. BOUSSION, P. MALLET and M. BULOT, Secondary coordinated voltage control system: Feedback of EdF, in Proc. IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, July 2000.
- [44] (SILVA, 2007), R. J. G. C. SILVA, Impedância de Compensação de Queda de Tensão em Controles Conjuntos de Tensão de Usinas - Uma Forma de Controle Secundário de Tensão

Weverson dos Santos CIRINO, Daniel Guzmán Del RIO, Ubiratan Holanda BEZERRA– **Ferramenta Computacional para o Cálculo de Fluxo de Potência: Uma Nova Abordagem em Rede de Distribuição de Energia Elétrica Radial Fracamente Malhada com Geração Distribuída (GD) e Conrole Coordenado de Tensão (CCT)**

Descentralizado. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Itajubá. MG, 2007.

[45] (LAGONOTTE, SABONNADIÈRE, LÉOST & PAUL, 1989), P. LAGONOTTE, J. C. SABONNADIÈRE, J. Y. LÉOST and J. P. PAUL, Structural Analysis of the Electrical System: Application to Secondary Voltage Control in France. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 479 - 486, May 1989.

[46] (GOMES, MARTINS & SANTOS, 2002), C. B. GOMES, N. MARTINS e M. G. SANTOS, Estudos Preliminares da Aplicação de Controle Coordenado de Tensão na Área Rio. VII EDAO, 01-PU/02, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 10 a 14 de março de 2002.

[47] (CORSI, MARANNINO, LOSIGNORE, MORESCHINI & PICCINI, 1995), S. CORSI, N. MARANNINO, G. LOSIGNORE, G. MORESCHINI and G. PICCINI, Coordination between the reactive power scheduling function and the hierarchical voltage control of the EHV ENEL system, IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, pp. 686 – 694, May 1995.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Name: WEVERSON DOS SANTOS CIRINO

Affiliation: Universidade do Estado do Amazonas (Amazonas State University)

Contact Information: wdsantos@uea.edu.br

Graduated in Telecommunications Engineering from Centro Universitário de Manaus - CEULM/ULBRA in 2007. Has completed specializations in: [1] Electric Power Systems by Centro Educacional Radiante in 2020; [2] MBE (Master of Business Engineering) in Renewable Energies from the International University - UNINTER in 2019; [3] Network and Telecommunications Systems Engineering at Universidade Paulista - UNIP/Manaus in 2009, and [4] Cryptography and Network Security at Universidade Federal de Fluminense - UFF/RJ in 2009. He completed his Master's in Electrical Engineering at Universidade Federal do Pará - UFPA in 2011 in the subarea of Electric Power Systems - SEP. He is an Assistant Professor with a Master's degree in the permanent staff of the University of the State of Amazonas, located at the Escola Superior de Tecnologia in the Electrical Engineering course since 2011. He is a doctoral student of the Postgraduate Program in Electrical Engineering at the Federal University of Pará - PPGEE /UFPA His areas of interest are: Electrical Power Systems (generation, transmission and distribution), Distributed Generation, Renewable Energies, Electrical and Electronic Circuits and Materials, Electrical Machines and their Drives and Arduino Projects, among others.

Most relevant publications:

- *Author of the paper: Aplicação de Filtro Harmônico em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão utilizando Lógica Fuzzy.* CIRINO, W. S.; LEITE, J. C.; COSTA JUNIOR, C. T. ; TOSTES, M. E. L.. ISBN: 978-959-247-077-4. Memórias Técnicas de dicho II Convención Internacional de la Ingeniería en Cuba – CIIC, Varadero – Matanzas, Cuba: Editorial Obras, 2010.
- *Author of the paper: Geração de energia elétrica através de células a combustível: um breve estudo e levantamento inicial dos impactos da interligação ao sistema elétrico isolado.* CIRINO, W. S.; HOLANDA, U. B. ISBN: 978-959-247-128-3. Memórias Técnicas de dicho XI Congreso Internacional de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico - ALTAE, Habana, Cuba: Editorial Obras, 2013.
- *Participant as co-author of the paper: Propriedades Elétricas das Buchas de Isolamento das Subestações de Alta Tensão: um Estudo das Tecnologias - Materiais.* NETO, L. P. D., CIRINO, W. S. & HOLANDA, U. B. ISBN: 978-959-247-128-3. Memórias Técnicas de dicho XI Congreso Internacional de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico - ALTAE, Habana, Cuba: Editorial Obras, 2013.
- *Author of the paper: Sistema de Control de Temperatura Digital como Herramienta para la Eficiencia Energética em la Industria.* CIRINO, W. S.. ISBN: 978-959-247-128-3.

Weverson dos Santos CIRINO, Daniel Guzmán Del RIO, Ubiratan Holanda BEZERRA–
Ferramenta Computacional para o Cálculo de Fluxo de Potência: Uma Nova Abordagem em Rede de Distribuição de Energia Elétrica Radial Fracamente Malhada com Geração Distribuída (GD) e Conrole Coordenado de Tensão (CCT)

Memorias Técnicas de dicho III Convencion Internacional de la Ingenieria em Cuba - CIIC, Varadero - Matanzas, Cuba: Editorial Obras, 2014.

- *Author of the paper: Optimización del proceso de montaje de componentes SMD usando algoritmo genético mul-tioobjetivo en la industria.* CIRINO, W. S.. ISBN: 978-959-247-128-3. Memorias Técnicas de dicho III Convencion Internacional de la Ingenieria em Cuba - CIIC, Varadero - Matanzas, Cuba: Editorial Obras, 2014.
- *Participant as co-author of the paper: Absorção Ionosférica.* AGUIAR JUNIOR, J. W. & CIRINO, W. S.. ISN: 2359-6457. Anais do Congresso de Iniciação Científica do Inatel – INCITEL, Santa Rita do Sapucaí – MG, Brasil, 2013.
- *Participant as co-author of the paper: Campo Geomagnético e a Ionosfera da Terra: suas influências nas Telecomunicações.* AGUIAR JUNIOR, J. W. & CIRINO, W. S.. ISN: 2359-6457. Anais do Congresso de Iniciação Científica do Inatel – INCITEL, Santa Rita do Sapucaí – MG, Brasil, 2013.

Name: DANIEL GUZMÁN DEL RÍO

Affiliation: Universidade do Estado do Amazonas (Amazonas State University)

Contact Information: drío@uea.edu.br

Bachelor's degree in Electrical Engineering from the Electrotechnical Faculty of the Institute for Cinema Engineers of Leningrad, today (St. Petersburg State University of Cinema and Television, <http://www.gukit.ru/ftkt>), Russia (1985), Master's degree in Electrical Engineering, area of Systems Engineering from the Polytechnic School of the University of São Paulo (1999) and PhD in Automation and Control Engineering from the Higher Polytechnic Institute José Antonio Echeverría, Habana (2001), revalidated by the Federal University of Pará (UFPA), Brazil, 2017. Has experience in the area of Electrical Engineering, with emphasis on Electric Circuits, Industrial Process Automation, acting mainly in the following topics: electric circuits, electronics, control, modeling, simulation and multivariable processes, power generation and energy efficiency. Has 34 years as Professor in Higher Education in Electrical Engineering, Electronics and Automation and Control. Professor and Researcher at EST/UEA Manaus from 2004 to 2006 and from 2011 to 2013, Volunteer Professor at EST/UEA from 2014 to 2015. He is currently an Adjunct A Career Professor at the Amazonas State University.

Most relevant publications:

- *Author of the paper: Pesquisa sobre eficiência energética: Um estudo de desenho teórico-metodológico para prédios e indústrias da Amazônia.* DEL RIO, D. G., SOUSA D., TORNE, I. G., GADELHA, I. S. F., GARCIA, C. E. A., SANTOS, P. A. ISSN: 2525-8761. Brazilian Journal of Development. v.7, p.69238 - 69259, 2021.
- *Participant as co-author of the paper: Projeto de um piloto automático para um veículo aéreo não tripulado em fase de voo de cruzeiro.* VILAÇA, N. L., DEL RIO, D. G., KIELING, A. C., DOS SANTOS M. D.; ISSN 2286-4822, ISSN-L 2286-4822. European Academic Research, International Multidisciplinary Research Journal. v.IX, p.3428 - 3451, 2021.
- *Author of the paper: Modelación y simulación del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato-amoniaco con minerales lateríticos cubanos* DEL RÍO, D. G.; GARCIA, C., MISA, R. LL., COLUMBIE, A. O.; ISSN 1993-8012. Revista Minería y Geología, Cuba, v. 17, Nº 2, p. 61 - 71, 2000.

Name: UBIRATAN HOLANDA BEZERRA

Affiliation: Universidade Federal do Pará (Federal University of Pará)

Contact Information: bira@ufpa.br

He holds a degree in Electrical Engineering from the Federal University of Pará (1976), a Master's degree in Electrical Engineering from the Federal University of Itajubá (1980) and a PhD in Electrical Engineering from the Federal University of Rio de Janeiro (1985). He is currently a professor at the Federal University of Pará, working in undergraduate and graduate education, with

Weverson dos Santos CIRINO, Daniel Guzmán Del RIO, Ubiratan Holanda BEZERRA–
Ferramenta Computacional para o Cálculo de Fluxo de Potência: Uma Nova Abordagem em Rede de Distribuição de Energia Elétrica Radial Fracamente Malhada com Geração Distribuída (GD) e Conrole Coordenado de Tensão (CCT)

master's and doctoral guidance. Researcher at CEAMAZON - Center of Excellence in Energy Efficiency in the Amazon, where he develops research and consultancy for companies in the electricity sector, focused on preferred topics: Safety Assessment of Electrical Systems; Electric Power Quality; Distributed generation; Application of Computational Intelligence Techniques in Electrical Systems; Planning and Operation of Power Distribution Networks.

Most relevant publications:

- *Participant as co-author of the paper: Technical Loss Calculation in Distribution Grids Using Equivalent Minimum Order Networks and an Iterative Power Factor Correction Procedure.* MOREIRA RODRIGUES, Carlos Eduardo; DE LIMA TOSTES, Maria Emilia; HOLANDA BEZERRA, Ubiratan; MOTA SOARES, Thiago; ORTIZ DE MATOS, Edson; SERRA SOARES FILHO, Lázaro; DOS SANTOS SILVA, Elaine Cristina; FERREIRA RENDEIRO, Michel; JEFERSON DA SILVA MOURA, Carlos. *Energies* **JCR**, v. 14, p. 646, 2021.
- *Participant as co-author of the paper: Uma Metodologia para Otimização do Conforto Visual e da Eficiência Energética utilizando a Tecnologia BIM.* DUARTE, J. G. C. L. M.; ZEMERO, B. R.; TOSTES, M. E. L.; BEZERRA, U. H. ISSN: 1809-3957. *Revista SODEBRÁS*, v. 16, p. 61-67, 2021.