

## INFORMAÇÕES GERAIS DO TRABALHO

**Título do Trabalho:** Proposta de ajuste do sistema de proteção considerando a relação entre correntes de curto circuito e o nível de carregamento em sistemas de distribuição de energia elétrica.

**Autores:** Prof. Dr. Renan Souza Moura, Prof. Dr. Carlos Renato Borges dos Santos, Luís Henrique Rodrigues Diniz, Paula Thereza Gewehr Portela, Edson Henrique Silva Gomes.

**Palavras-chave:** Sistemas de proteção, Corrente de curto-circuito, Estabilidade de tensão

**Campus:** Formiga

**Área do Conhecimento (CNPq):** Sistemas Elétricos de Potência

### RESUMO

Preocupações com condições operativas têm crescido nas últimas décadas em sistemas elétricos, pois visam manter a integridade e a confiabilidade no caso de ocorrência de algum tipo de distúrbio, como aumento/diminuição de carga, alteração de *tap* de transformadores ou curtos-circuitos. Devido a isto, para que o sistema possua a capacidade de manter a tensão em níveis adequados, são empregados reguladores de tensão na rede. Os reguladores de tensão ajustam os valores de *tap* de acordo com o nível de carregamento. Como cada posição de *tap* está associado a um valor de impedância, existirão valores distintos de correntes de curtos circuitos à medida que ocorram mudanças de *taps* em função do aumento de carga no sistema. Assim, a preocupação deste trabalho é relacionar as correntes de curto-circuito com níveis diferentes de carregamento, a fim de propor que a proteção do sistema seja dinâmica, ao invés de valores fixos, como comumente é encontrado em disjuntores e fusíveis. Neste contexto, a curva PV, aplicada em estudos de estabilidade de tensão e construída por meio de sucessivos fluxos de potência, é utilizada para ter o conhecimento dos pontos de carga leve, moderada e máxima. Em seguida, foram obtidos valores das correntes de curto-circuito para cada um destes pontos dentro da curva PV. Os resultados demonstram que as correntes de curto-circuito apresentam valores distintos para os diferentes pontos da curva PV, fato este que comprova a necessidade de uma proteção dinâmica que considere a potência que está sendo transmitida em cada instante devido a presença de automatização do sistema.

### INTRODUÇÃO:

A principal finalidade de um sistema elétrico de potência é atender a potência requerida pelo consumidor. Visto que a transmissão de potência está atrelada com o fator de potência, a mesma deve ocorrer respeitando os limites supracitados, pois caso contrário, resulta em um baixo fator de potência no sistema, o que causa uma elevação da corrente elétrica, gerando maiores perdas no processo.

Em virtude disto, é grande a preocupação em garantir as condições operativas das cargas atendidas, fazendo com que surjam meios de se manter a estabilidade dos níveis de tensão. Estabilidade de tensão é definida como a capacidade que um sistema apresenta de se manter em níveis adequados de tensão após a ocorrência de algum distúrbio (KUNDUR et al., 2004), podendo ser causado por diversos fatores como alteração na carga, mudanças de *taps* de transformadores, curtos-circuitos, entre outros.

Almeida et al. (2013), Guimarães et al. (2011), Mohn e Souza (2006) propõem análises do comportamento da estabilidade do sistema baseados na curva PV, onde os níveis de tensão são dados em função do carregamento do sistema.

Para manter os níveis especificados de tensão para o consumidor, os sistemas atuais empregam o uso de reguladores de tensão, a fim de garantir que o consumidor receba o valor contratado. Porém, a proteção para correntes de curto-circuito é feita basicamente por dispositivos de ajuste fixo, como

disjuntores e fusíveis, onde estes não levam em conta a potência que está sendo transmitida em determinado instante e nem o comportamento de os reguladores inseridos no sistema elétrico.

Assim, fica evidente a importância de analisar a estabilidade de sistemas elétricos de potência, visto que é preciso compreender o comportamento do sistema como forma de evitar condições operativas indesejáveis. Este trabalho visa o estudo da relação entre diversos tipos de falta e o fator de carga (carregamento), bem como o comportamento da curva PV com a presença de reguladores de tensão no sistema e a influência destes sobre a magnitude das correntes de curto. Com isto será possível estabelecer que os ajustes de proteção contra curtos circuitos devem ser feitos de forma dinâmica, de acordo com o carregamento atual do sistema, e não por valores fixos como usualmente é feito.

Como forma de organizar o trabalho, a primeira seção introduz a relevância dos estudos de estabilidade de tensão e a influência que o carregamento exerce sobre os sistemas elétricos de potência. A metodologia apresenta os testes feitos para dois sistemas diferentes, demonstrando os fluxos de potência e cálculos de corrente de curto circuito de cada um. Posteriormente, são dispostos seus respectivos resultados e a comparação entre eles. O trabalho se encerra tratando das conclusões e considerações finais.

## METODOLOGIA:

O trabalho consiste em apresentar dados coletados por meio de um algoritmo desenvolvido no *software* MATLAB, no qual simula um ramo de um sistema de distribuição, onde sua disposição é baseada na IEEE *Radial Distribution Test Feeders* (1991). Inicialmente é feita a simulação de um sistema não-automatizado, ou seja, sem a presença de dispositivos reguladores de tensão, com a finalidade de comparar os dados obtidos com os apresentados na literatura de W. Kersting (2012), e desta forma, validá-los. A figura 1 demonstra a configuração adotada.

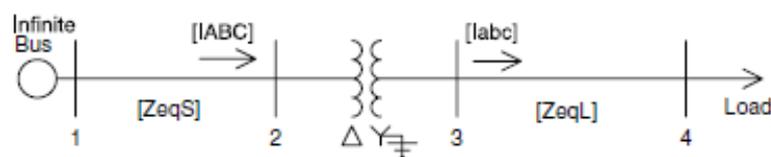


Figura 1 – Sistema radial de distribuição com 4 nós.  
Fonte: Kersting (2012).

Baseado no fato de que neste tipo de configuração, a tensão na carga está sujeita a variações, foi proposto a análise do comportamento da tensão entregue no nó 4, de acordo com a variação do carregamento, a fim de verificar se a tensão consegue se manter nos limites aceitáveis para o consumidor (carga), por meio da curva PV.

A variação do carregamento é feita por meio de um fator multiplicador da potência aparente da carga, chamado de fator de carga. O ponto nominal de carga é dado pelo fator de carga igual à 1, equivalente à 100%. Logo, iniciou-se este fator abaixo do nominal e foi acrescido um valor de 0,1 (10%) a cada iteração, até que haja um colapso de tensão, conseqüentemente, ocorrendo o desligamento do sistema, sendo este ponto, a margem de operação.

Feito isto, passa-se a analisar o comportamento do mesmo sistema, após inserção de um regulador de tensão na linha de distribuição. Este dispositivo realiza a mudança de tensão por meio da mudança dos *taps* do enrolamento série do autotransformador. Como será necessário elevar os níveis de tensão na carga, a posição escolhida para mudança destes *taps* é a de aumento. Com isto, a intenção é verificar se os níveis de tensão serão mantidos em níveis toleráveis, independentemente do fator de carga submetido, e se a margem de operação sofrerá alteração. O sistema adaptado é disposto na figura 2.

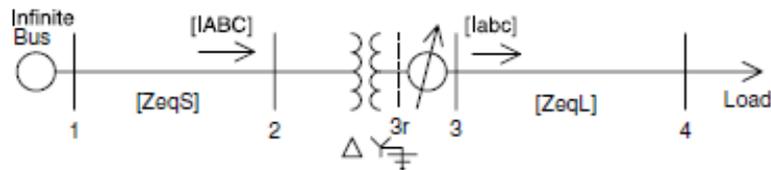


Figura 2 – Sistema radial de distribuição com quatro nós, com a presença de regulador de tensão.  
Fonte: Kersting (2012).

A partir desta configuração, são aplicados diversos tipos de curtos-circuitos na barra 4, de forma que possibilite a visualização da alteração na amplitude da corrente em função do carregamento atual do sistema. Uma vez que os reguladores de tensão são diretamente afetados pelo carregamento, é necessário analisar a corrente de curto-circuito que passa por estes dispositivos, pois de acordo com o valor do *tap* atual do equipamento, a corrente percorrerá um caminho de impedância diferente, e dessa forma, a impedância possuindo um valor maior, o nível de carregamento afetará a corrente de curto circuito.

Logo, após realizar este processo para diferentes tipos de faltas elétricas, será possível comprovar influência do carregamento sob a magnitude das correntes de curto-circuito em um sistema de distribuição, e a importância da proteção deste sistema ser dimensionada e planejada em função desta operação dinâmica.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Como visto anteriormente, o primeiro sistema não apresenta reguladores em sua estrutura, logo, a tensão no ponto de entrega tende a se alterar conforme o carregamento varie. Com o auxílio do MATLAB, é traçada a curva PV na figura 3, a fim de verificar a estabilidade deste dado sistema. Os valores mais significativos são expostos pela tabela 1 posteriormente.

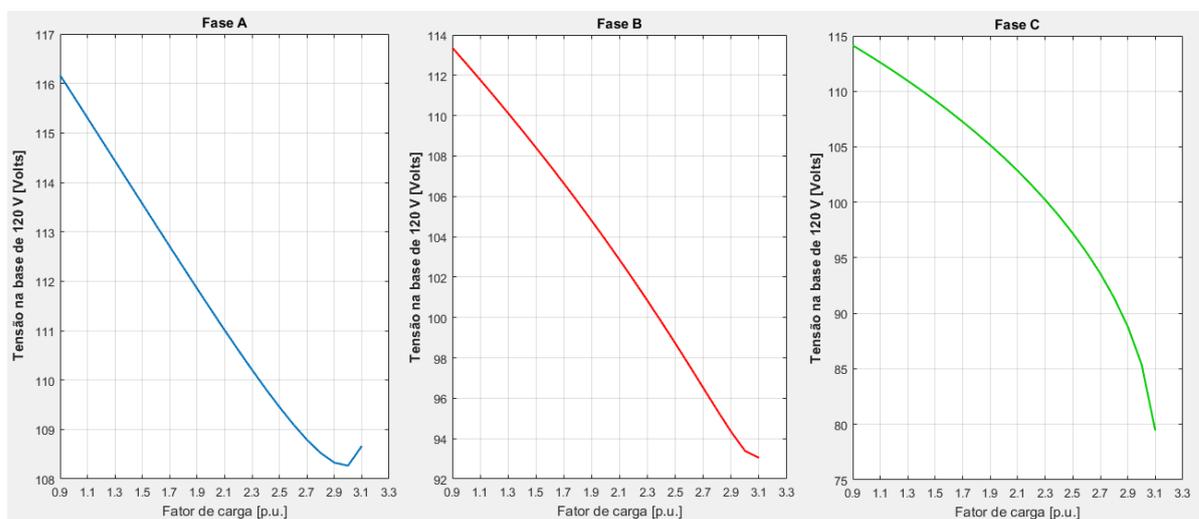


Figura 3 – Comparativo das curvas PV para as três fases do sistema sem regulador.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 1 – Tensão na carga de acordo com o carregamento do sistema.

<b>Tensão no barramento de carga em função do carregamento (Volts)</b>								
Carga leve (0,9 p.u.)			Carga moderada (1,7 p.u.)			Carga máxima (3,1 p.u.)		
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
116,2	113,4	114,1	112,7	106,6	107,2	108,7	93,05	79,44

Fonte: Próprio autor.

Pela disposição dos dados, verificamos que na prática, o sistema I é totalmente inviável do ponto de vista de estabilidade e qualidade de energia, e por consequência, econômico. O nó 4 opera com a tensão nominal na base de 120 V, ou seja, o mínimo aceitável deve ser este valor de base, lido pelo TP, de 120 V.

Contudo, em nenhum ponto de operação, o sistema consegue entregar este nível requerido de tensão. Esta situação não é desejável, visto que, a PRODIST Módulo 8 (2018) define que para tensões de regime permanente entre 1 kV e 69 kV, níveis abaixo de 90% da tensão de referência (barramento de carga) são considerados críticos.

Todavia, por não possuir reguladores, o sistema terá menos dispositivos exercendo influência sobre ele. Isto afeta o ponto de máximo carregamento do sistema. Examinando o gráfico encontra-se que para todas as fases, o sistema consegue operar até 3,1 p.u. de carga, antes que entre em colapso e se desligue totalmente.

Com os resultados anteriores obtidos, fica evidente o porquê da grande maioria dos sistemas de distribuição possuírem dispositivos reguladores de tensão. Portanto, foi feita a inserção deste equipamento e obtida a tensão no nó quatro (4) em função da variação do carregamento. A curva PV resultante é mostrada na figura 4, bem como os valores mais significativos são expostos pela tabela 2.

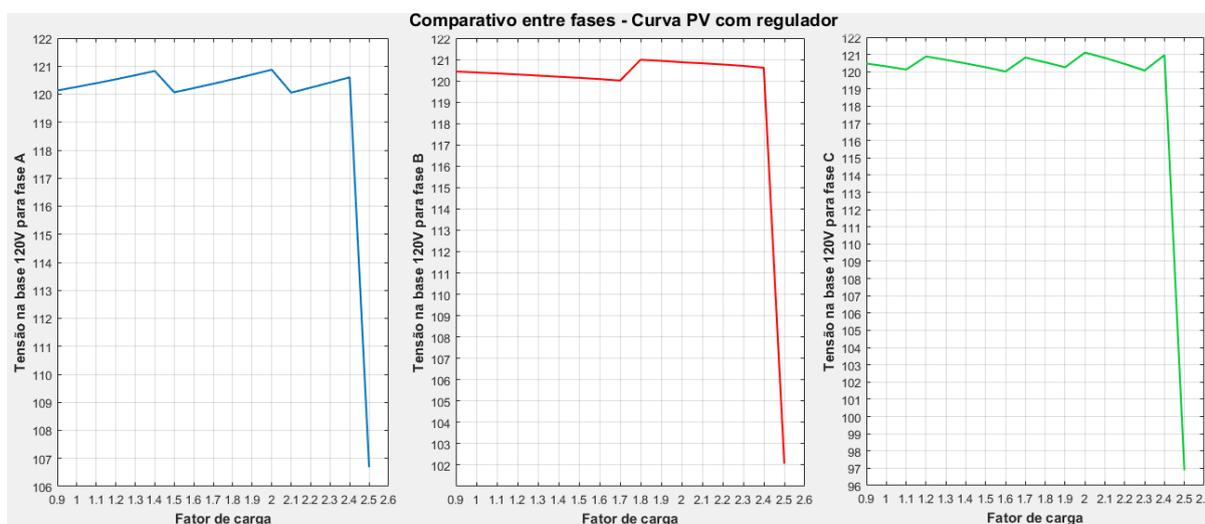


Figura 4 – Comparativo das curvas PV para as três fases do sistema, com regulador inserido.  
Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 – Tensão na carga de acordo com o carregamento do sistema.

<b>Tensão no barramento de carga em função do carregamento [Volts]</b>								
Carga leve (0,9 p.u.)			Carga moderada (1,7 p.u.)			Carga máxima (2,4 p.u.)		
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
120,13	120,44	120,48	120,37	120,02	120,82	120,61	120,62	120,96

Fonte: Próprio autor.

Com estes valores, comprova-se a eficácia da inserção de reguladores de tensão no sistema, posto que, em todos os níveis de carregamento menores que a margem de carga, a tensão no barramento estará com níveis adequados, não apresentando nenhum ponto que ultrapasse o limite mínimo de 120 V.

Visto que, ao passo que a potência do barramento de carga se eleva, a corrente para supri-la também aumenta. Como o regulador de passo de tensão faz a leitura da queda de tensão na linha entre o regulador e o centro de carga, o fato de circularem correntes de maior amplitude faz com que a queda seja cada vez maior, gerando maiores esforços do equipamento. Desta forma, o limite máximo de operação será menor se comparado ao sistema I, sendo este máximo carregamento de valor igual à 2,4 p.u.

Com isto, o cálculo das correntes de curto-circuito é feito para ambas as configurações, respeitando o limite máximo de operação, para três níveis de carregamento distintos. Para a primeira análise, considera-se que o curto ocorreu entre duas fases. Os resultados obtidos são dispostos pelas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Correntes de curto circuito para o sistema sem regulador.

<b>Correntes de curto circuito entre as fases A e B [A]</b>								
Carga leve (0,9 p.u.)			Carga moderada (1,7 p.u.)			Carga máxima (2,4 p.u.)		
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
4193,909	4193,909	0	4193,909	4193,909	0	4193,909	4193,909	0

Fonte: Adaptado de Kersting (2012).

Tabela 4 – Correntes de curto circuito para o sistema com regulador de tensão inserido.

<b>Correntes de curto circuito entre as fases A e B [A]</b>								
Carga leve (0,9 p.u.)			Carga moderada (1,7 p.u.)			Carga máxima (2,4 p.u.)		
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
565,81	565,81	0	570,74	570,74	0	576,73	576,73	0

Fonte: Próprio autor.

Comparando as tabelas 3 e 4, percebe-se que para sistemas onde não há a presença de reguladores de tensão, o carregamento não exerce influência sobre a corrente de curto-circuito. O sistema com regulador apresenta particularidades que não existiam no sistema anterior. O carregamento passa a influenciar, mesmo que indiretamente, na corrente de curto-circuito, pois existe uma variação na amplitude que não era visualizada no sistema sem regulador. Como o sistema deste artigo é apenas um segmento de

um sistema de distribuição, a variação não possui uma grande diferença entre o menor ponto analisado ( $FC = 0,9$ ) e o maior ( $FC=2,4$ ), mas em segmentos consideravelmente maiores, esta diferença aumenta acompanha este comportamento, podendo apresentar dezenas de Ampères de diferença. Este fato só comprova o quão necessário é cobrir uma faixa de valores de correntes de curto circuito, não somente um valor fixo, uma vez que o carregamento do sistema é totalmente dinâmico, e em um determinado período, um dia por exemplo, ocorrem inúmeras variações no fator de carga.

Também nota-se que houve uma diminuição da magnitude da corrente de curto-circuito em comparação com a tabela 3. Este fator ocorre devido ao módulo da impedância do regulador ser muito maior do que as impedâncias sem a presença do regulador. Logo, como todos os equipamentos estão dispostos em série, o regulador apresenta um acréscimo significativo à impedância equivalente de Thévenin.

Ainda são feitos testes alterando o tipo de falta elétrica. Foi simulada uma falta monofásica para a terra, devido ao fato de ser o tipo de curto mais comum de ocorrer. Os resultados obtidos são dispostos pela tabela 5.

Tabela 5 – Correntes de curto circuito para uma falta fase-terra.

<b>Correntes de curto circuito da fase A para a terra [A]</b>								
Carga leve (0,9 p.u.)			Carga moderada (1,7 p.u.)			Carga máxima (2,4 p.u.)		
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
613,82	0	0	620,34	0	0	625,64	0	0

Fonte: Próprio autor.

Portanto, evidencia-se que a falta para a terra aumenta consideravelmente a amplitude da corrente de curto-circuito, fazendo com que a proteção tenha que atuar para valores bem acima dos obtidos quando consideradas apenas as faltas entre fases.

Por fim, simulou-se uma falta trifásica, que embora seja incomum, pode ser a mais danosa ao sistema. Os resultados deste teste são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Correntes de curto circuito para uma falta trifásica.

<b>Correntes de curto circuito entre as fases A, B e C [A]</b>								
Carga leve (0,9 p.u.)			Carga moderada (1,7 p.u.)			Carga máxima (2,4 p.u.)		
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
640,54	649,43	639,71	643,62	652,55	642,72	646,028	654,99	645,07

Fonte: Próprio autor.

Assim sendo, com os resultados obtidos, pode-se afirmar que o curto-circuito trifásico é o que apresenta maior amplitude, logo, comprovando o fato de ser o que mais causa os maiores danos.

Desta forma, é verificado que a diferença dos valores de corrente de curto-circuito de acordo com a falta é significativa. A diferença entre o maior valor e o menor valor obtidos pelos testes, para diferentes

pontos de carregamento, ultrapassa 80 A, resultando em amplas faixas de operação, comprovando a necessidade de uma proteção dinâmica que atue segundo a operação dinâmica do regulador de tensão.

## CONCLUSÕES:

Os resultados demonstraram que os sistemas de distribuição de energia atuais necessitam de reguladores de tensão para manter a tensão em níveis adequados, visto que sistemas não controlados deixam de atender às especificações de qualidade de energia dispostas pela PRODIST Módulo 8 (2018).

O uso destes dispositivos faz com que a corrente de curto-circuito passe a variar conforme o carregamento muda. Isso torna evidente que a proteção do sistema elétrico deve possuir ajustes dinâmicos, dado que o sistema apresenta características não lineares, como visto pela curva PV.

Além disso, foi observado que o comportamento da corrente de curto-circuito varia de acordo com o tipo de falta ocorrido, podendo apresentar maiores amplitudes para determinados tipos de faltas à medida que o carregamento aumenta, mostrando mais uma vez que o ajuste fixo pode comprometer a integridade do sistema.

Os estudos desenvolvidos podem ser aplicados em sistemas com segmentos maiores, ou até mesmo com uma estrutura mais ampla, na qual apresente um número maior de barramentos. O ajuste dinâmico poderá ser inserido dentro do conceito de redes elétricas inteligentes (*smart grids*).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

KUNDUR, P. et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. **IEEE transactions on Power Systems**, v. 19, n. 3, p. 1387-1401, 2004.

ALMEIDA, A. B. et al. Probabilistic voltage stability assessment considering renewable sources with the help of the PV and QV curves. **IET Renewable Power Generation**, v. 7, n. 5, p. 521-530, 2013.

GUIMARÃES, P. et al. QV and PV curves as a planning tool of analysis. In: **Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on**. IEEE, p. 1601-1606, 2011.

MOHN, F. W.; DE SOUZA, A. C. Z. Tracing PV and QV curves with the help of a CRIC continuation method. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 3, p. 1115-1122, 2006.

KERSTING, W. H. **Distribution system modeling and analysis**. 3 ed. CRC press, 2012.

FEEDERS, Radial Distribution Test. IEEE distribution planning working group report. **IEEE Trans. Power Systems**, v. 6, n. 3, p. 975-985, 1991.

ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica**. Revisão 10 (2018).

\_\_\_\_\_. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. Revisão 7 (2017).