



Artigo

Algoritmos e Modelos do LDC e do OLTC: Uma Análise Comparativa para Estudos de Fluxo de Carga

Adriano Aron Freitas de Moura^[1], João Frederico Souza de Paula^[2], Adriano Araújo Gonçalves^[3],
Ednardo Pereira da Rocha^[4], Victor de Paula Brandão Aguiar^[5] e Ailson Pereira de Moura^[6]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-árido; adrianoaron@ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-árido; jfrederico@ieee.org

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-árido; adriano.junior@alunos.ufersa.edu.br

^[4] Universidade Federal Rural do Semi-árido; ednardo.pereira@ufersa.edu.br

^[5] Universidade Federal Rural do Semi-árido; victor@ufersa.edu.br

^[6] Universidade Federal do Ceará; ailson@ufc.br

Recebido: 27/06/2021;

Aceito: 15/08/2021;

Publicado: 06/12/2021.

Resumo: O referido trabalho tem como objetivo verificar por meio de simulações com algoritmos base dos reguladores OLTC (*on-load tap changer*) e LDC (*load tap changer*) a equivalência em termos de simulação de ambos os reguladores. A simulação baseou-se em, por meio da modelagem matemática de ambos os métodos, criar *scripts* e simulá-los utilizando um problema genérico de fluxo de carga como sistema teste, comparando os valores dos *tap's* obtidos por meio de cada método, podendo assim, verificar tal equivalência. A simulação do sistema teste foi realizada no software Matlab®. Realizadas as simulações, foi possível inferir a equivalência em termos de simulação dos algoritmos de ambos os reguladores para o sistema teste utilizado, uma vez que em todas as simulações realizadas, os *tap's* do método OLTC apresentaram valores idênticos aos simulados por meio do método LDC. Simulações como está demonstram a viabilidade de estudos aprofundados em algoritmos de fluxo de carga. Todavia, faz-se necessário o aperfeiçoamento de simulações em sistemas testes de maior magnitude a fim a de verificar a equivalência em questão, bem como a implicância delas nos referidos sistemas.

Palavras-chave: LDC; OLTC; reguladores

Abstract: The purpose of this work is to verify the simulation equivalence of both regulators by means of simulations with OLTC (*on-load tap changer*) and LDC (*load tap changer*) controllers. The simulation was based, through the mathematical modeling of both methods, to create scripts and simulate them using a generic problem of load flow as a test system, comparing the values of the *tap's* obtained by means of each method, such equivalence. The simulation of the test system was performed in Matlab® software. After the simulations, it was possible to infer the equivalence in terms of simulation of the algorithms of both regulators for the test system used, since in all the simulations performed, the OLTC method tapes presented values identical to those simulated using the LDC method. Simulations as such demonstrate the feasibility of in-depth studies on load flow algorithms. However, it is necessary to improve simulations in larger test systems in order to verify the equivalence in question, as well as the implication of the same in said systems.

Key-words: LDC; OLTC; regulators

1. INTRODUÇÃO

Cargas ligadas às redes de transmissão e distribuição sofrem frequentes oscilações ao decorrer do dia, tanto em virtude de manobras como de demanda, a fim de manter os níveis de tensão dentro do estabelecido pelas agências reguladoras. Sendo assim, se torna essencial implementar métodos de controle de tensão em redes de distribuição, como os métodos LDC e OLTC.

A regulação pelo método OLTC (*on-load tap changer*) também conhecido apenas como LTC (*load tap changer*) é utilizada largamente em sistemas de transmissão e se baseiam na mudança de *tap* do transformador. De acordo com [1], os *tap*'s permitem um ajuste de $\pm 10\%$ na variação de tensão e/ou alteram o ângulo de fase da tensão de linha. Cada LTC possui um relé regulador automático de tensão conhecido como AVR ou “relé 90” [2]. O regulador LDC por sua vez, é utilizado em sistemas de distribuição, mais precisamente no barramento do consumidor. Ele regula a tensão por meio de um circuito de compensação. Para [3] o propósito da compensação por queda de tensão é modelar a queda de tensão da linha de distribuição do regulador para o centro de carga.

Com base em toda teoria sobre métodos de regulação de tensão, bem como sua modelagem matemática, o presente trabalho realiza uma simulação com os algoritmos base dos reguladores LTC e LDC a fim de verificar a equivalência em termos de simulação dos algoritmos de ambos os reguladores, bem como a implicância de tal equivalência na simulação de sistemas do IEEE.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Transformadores com Mudança de TAP em Carga (OLTC)

Em subestações primárias, os transformadores possuem mecanismo de mudança de *tap* ou *tapes* (termo em português) sob carga, conhecidos como OLTC's (*On-Load Tap Changer*). Tais componentes são fundamentais e insubstituíveis na configuração de um sistema elétrico de potência. A maioria dos transformadores que dispõem de mudança de *tap*, o faz em carga, sendo este, o recurso mais eficaz para controle de tensão [4]. A atuação simultânea e coordenada dos transformadores LTC's permite assegurar condições satisfatórias de operação, bem como um aumento na margem de segurança da tensão fornecida [5].

Os *tap*'s permitem um ajuste de $\pm 10\%$ na variação de tensão e/ou alteram o ângulo de fase da tensão de linha [1]. Tal mudança de *tap* também pode ser feita com o transformador energizado, sendo esta operação denominada de LTC (*Load tap changer*). Ainda de acordo com [1] (p. 10) “a operação de mudança de *tap* pode ser entendida como uma chave rotatória com um esquema de passo frente/reverso fazendo com que o *tap* varie relação entre as espiras do primário e secundário”. O ajuste de transformadores deve ser feito de maneira adequada, uma vez que a atuação de um LTC no sistema pode gerar tanto benefício a barra controlada, como prejudicar barras eletricamente próximas [5]. De acordo com [2], cada LTC possui um relé regulador automático de tensão AVR ou “relé 90”. Ele monitora as grandezas e comanda as operações de mudança de *tap*. A Figura 1 ilustra o esquema de um transformador LTC e do relé regulador de tensão.

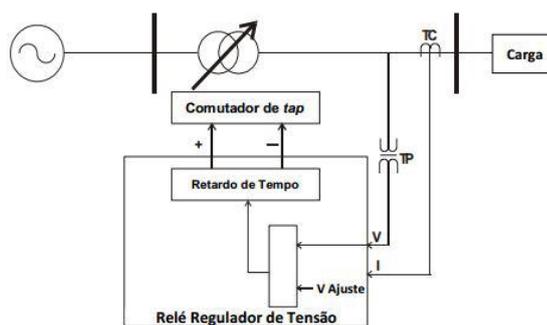


FIGURA 1. Esquema de um transformador com comutador de *tap* e relé regulador de tensão. (Adaptado de USIDA, 2007)

Como apontado por [2] (p. 27), “os LTC's são projetados para realizar 1 milhão de operações em sua vida útil. Em condições normais são realizadas em média 70 comutações de *tap* em um dia, um total de 25 mil por ano. A cada 100 mil comutações é necessária uma manutenção preventiva”. A Figura 2 ilustra o fluxo de funcionamento do relé AVR ou relé 90.

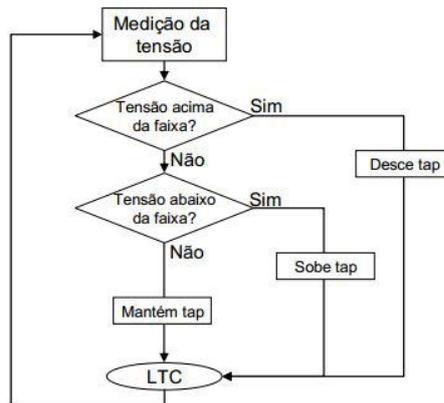


FIGURA 2. Fluxo de funcionamento do relé 90. (Adaptado de Spatti, 2007)

Todo o controle do relé é feito por meio de motores e eles possuem contadores de operações que auxiliam a equipe de manutenção indicando o momento adequado para manutenção do dispositivo [1].

2.1.1. Modelagem do transformador com OLTC

A presente seção apresentará a modelagem matemática, bem como os circuitos equivalentes do transformador com mudança de *tap* (LTC). A fim de simplificação, alguns cálculos e manipulações matemáticas serão omitidos. A Figura 3 ilustra o circuito do transformador LTC.

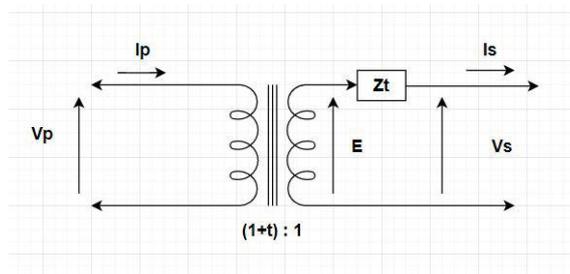


FIGURA 3. Circuito de um transformador OLTC. (Adaptado de Powell, 2005)

Com base na Figura 3, a tensão no primário é dada por:

$$V_p = E \times (1 + t) \quad (1)$$

Já, a tensão no secundário, pode ser dada por:

$$V_s = E - I_s \times Z_t \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1), obtém-se:

$$V_p = \{V_s + I_s \times Z_t\} \times (1 + t) \quad (3)$$

Isolando I_s , tem-se:

$$I_s = \frac{1}{Z_t} \left\{ \frac{V_p - V_s}{(1+t)} - \frac{tV_s}{(1+t)} \right\} \quad (4)$$

Sabendo que:

$$I_p = \frac{I_s}{(1+t)} \quad (5)$$

Substituindo (5) em (4) e realizando as devidas manipulações matemáticas, é obtido:

$$I_p = \frac{1}{Z_t} \left\{ \frac{V_p - V_s}{(1+t)} - \frac{t}{(1+t)} V_p \right\} \quad (6)$$

A Figura 4 ilustra o circuito equivalente do transformador com mudança de *tap* expresso em admitância, considerando que $y_t = \frac{1}{Z_t}$. As admitâncias são utilizadas a fim de modificar a matriz de admitância do sistema sempre que houver uma mudança no *tap* [7].

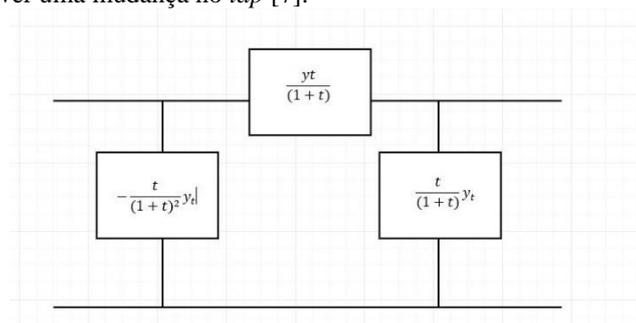


FIGURA 4. Circuito equivalente de um transformador com OLTC (em admitâncias). (Adaptado de Powell, 2005)

2.2. Transformação por Queda de Tensão

O controle de tensão em sistemas de distribuição é mais complexo do que em sistemas de transmissão, tendo em vista que se deve levar em conta a queda de tensão ao longo do alimentador, através do método LDC (*Line Drop Compensator*). De acordo com [2], a função do LDC é manter a tensão constante no barramento do consumidor. Já para [3] o propósito da compensação por queda de tensão é modelar a queda de tensão da linha de distribuição do regulador para o centro de carga. Sem a utilização de tal compensação, haverá no final do alimentador uma variação de tensão que dependerá da impedância do alimentador para uma condição de carga pesada, bem como da variação de corrente para uma situação de carga leve [6].

De acordo com [8] (p.3). o compensador “simula a impedância da linha desde os reguladores de tensão, até o ponto onde se deseja que a tensão seja constante [...]. O circuito básico do compensador simula as quedas de tensão existentes na linha, fazendo com que o regulador as compense”. A Figura 5 ilustra o circuito de compensação por queda tensão.

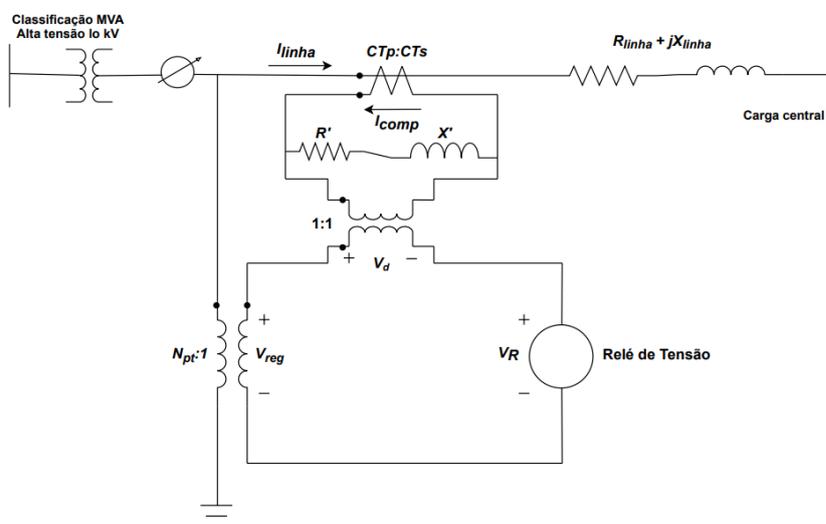


FIGURA 5. Circuito LDC. (Adaptado de Kersting, 2012)

Com base na Figura 5, a corrente da carga flui por uma impedância dada por:

$$Z_{eq} = R_{linha} + jX_{linha} \quad (7)$$

De acordo com [6] (p.23) “os valores de R e X são escolhidos para que a máxima elevação de tensão seja obtida sob carga pesada, enquanto a mínima seja obtida sob carga leve”. Com base nos valores de R_{linha} e jX_{linha} os valores de R e X são ajustados de forma a corresponder a tais impedâncias da linha. O relé irá ajustar o *tap* com base nos valores obtidos pelo transformador de potencial adicionado a tensão do circuito compensador. Não havendo compensação por queda de tensão, o relé regulador ajustará o *tap* com base nas informações obtidas pelo transformador de potencial.

A localização desse centro de carga é o grande empecilho do processo de regulação, pois a mesma tensão considerada “ideal” para um consumidor que esteja localizado próxima da subestação de distribuição poderá ser inadequada para um consumidor localizado distante dessa subestação. Em determinadas situações, faz-se necessário a instalação de circuitos reguladores específicos para tais situações [9].

2.2.1. Modelagem do compensador por queda de tensão

Para modelagem do compensador por queda de tensão faz-se necessário a utilização da Tabela 1 com os valores base para linha e compensador.

TABELA 1. Valores base para o cálculo da impedância do compensador. (Adaptado de Kersting, 2012)

<i>Base</i>	<i>Linha</i>	<i>Compensador</i>
Tensão	V_{LN}	$\frac{V_{LN}}{V_{TP}}$
Corrente	C_{TP}	C_{TS}
Impedância	$Z_{baselinha} = \frac{V_{LN}}{C_{TP}}$	$Z_{basecomp} = \frac{V_{LN}}{C_{TP} \times N_{TP}}$

O valor da impedância por unidade (p.u) é dado por:

$$R_{pu} + jX_{pu} = \frac{(R_{linha} + jX_{linha})}{Z_{base}} \quad (8)$$

$$R_{pu} + jX_{pu} = (R_{linha} + jX_{linha}) \times \frac{C_{TP}}{V_{LN}} \quad (9)$$

Onde V_{LN} e C_{TP} presentes na equação (9) representam respectivamente a tensão da linha a corrente no enrolamento primário do transformador de corrente. A impedância em p.u deve ser a mesma na linha e no compensador, logo:

$$R_{comp} + jX_{comp} = (R_{pu} + jX_{pu}) \times Z_{base} \quad (10)$$

Logo,

$$R_{comp} + jX_{comp} = (R_{linha} + jX_{linha}) \times \frac{C_{TP}}{V_{LN}} \times \frac{V_{LN}}{N_{PT} \times C_{TS}} \quad (11)$$

$$R_{comp} + jX_{comp} = (R_{linha} + jX_{linha}) \times \frac{C_{TP}}{N_{PT} \times C_{TS}} \Omega \quad (12)$$

O valor obtido da impedância do compensador através da equação 12 é dado em Ohms. Para obter o valor em volts multiplica-se a impedância do compensador pela corrente no enrolamento secundário do transformador de corrente.

$$R_{compV} + jX_{compV} = (R_{comp\Omega} + jX_{comp\Omega}) \times C_{TS} \quad (13)$$

$$R_{\text{compV}} + jX_{\text{compV}} = (R_{\text{linha}} + jX_{\text{linha}}) \times C_{\text{TS}} \times \frac{C_{\text{TP}}}{N_{\text{PT}} \times C_{\text{TS}}} \quad (14)$$

$$R_{\text{compV}} + jX_{\text{compV}} = (R_{\text{linha}} + jX_{\text{linha}}) \times \frac{C_{\text{TP}}}{N_{\text{PT}}} \quad \text{V} \quad (15)$$

Assim, pode-se obter o valor da impedância do compensador em volts, com base na impedância equivalente em Ohms do regulador no centro de carga.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada a fim de verificar a equivalência entre o regulador LDC e o transformador LTC em termos de simulação baseou-se em, por meio da modelagem matemática de ambos os métodos, criar *scripts* e simulá-los utilizando um problema genérico de fluxo de carga como sistema teste, podendo assim, verificar tal equivalência. A simulação do sistema teste foi realizada no software Matlab®.

3.1. Sistema teste

O sistema teste utilizado para fins de simulação foi adaptado de [3]. O referido sistema consiste em uma carga trifásica desbalanceada alimentada com 12,47 kV a aproximadamente 3 km da subestação. O mesmo fornece os dados de impedância da linha, tensões de linha da subestação, bem como valores de potência aparente da carga. Durante as simulações fez-se uso de diferentes valores para carga a fim de comparação. A Figura 6 e a Tabela 2 ilustram respectivamente o circuito equivalente do sistema e os valores de impedância, tensão e potência aparente na carga utilizados na simulação.



FIGURA 6 Sistema genérico. (Adaptado de Kersting, 2012)

TABELA 2. Dados utilizados para simulação. (Autoria Própria)

<i>Matrizes da Linha</i>	<i>Tensão de Referência da Subestação</i>	<i>Carga</i>
$[a] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$[V_{ref}] = \begin{bmatrix} 7200 \angle 0 \\ 7200 \angle -120 \\ 7200 \angle 120 \end{bmatrix}$	$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 2500 \angle 25.84 \\ 2000 \angle 31.79 \\ 1500 \angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$
$[b] = \begin{bmatrix} 0.8667 + j2.0417 & 0.2955 + j0.9502 & 0.2907 + j0.7290 \\ 0.2955 + j0.9502 & 0.8837 + j1.9852 & 0.2992 + j0.8023 \\ 0.2907 + j0.7290 & 0.2992 + j0.8023 & 0.8741 + j2.0172 \end{bmatrix}$		$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 200 \angle 25.84 \\ 300 \angle 31.79 \\ 400 \angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$
		$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 1000 \angle 25.84 \\ 1000 \angle 31.79 \\ 1000 \angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$
		$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 3000 \angle 25.84 \\ 3500 \angle 31.79 \\ 4000 \angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$

3.2. Script para o método LTC

Para realização do *script* para o método LTC, fez-se uso do circuito equivalente expresso em admitâncias apresentado na Figura 4, obtido após toda a modelagem matemática deduzida no tópico 2.1. No método em questão, o cálculo dos *tap's* é realizado de maneira iterativa, havendo necessidade de apenas um fluxo de carga. O *script* apresenta inicialmente um valor de partida nos *tap's*, sendo considerado 0.1 para todos e uma tolerância de 0,0001.

Para efeito de simplificação o *script* será omitido. Entretanto, a Figura 7 ilustra de maneira intuitiva o fluxograma do *script* de programação utilizado para o método LTC.

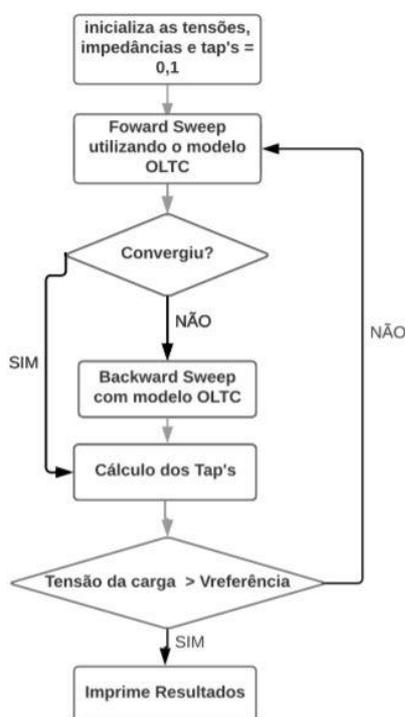


Figura 7. Fluxograma do *script* para LTC. (Autoria Própria)

3.3 Script para o método LDC

Para realização do *script* para o método LDC, fez-se uso de toda a modelagem matemática deduzida no item 3.2. No método em questão há o cálculo dos *tap's* é realizado por meio do fluxo de carga com sem regulador e com regulador. De maneira similar ao item 4.1 o *script* do método LDC será omitido para efeito de simplificação. A Figura 8 ilustra de maneira intuitiva o fluxograma do *script* de programação utilizado para o método LTC.

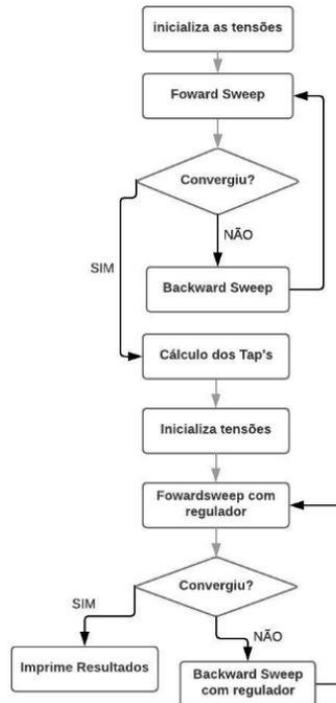


FIGURA 8. Fluxograma para o *script* do método LDC. (Autoria Própria)

4. RESULTADOS

Nas Tabela 3 e 4 são apresentados os valores dos *tap's* obtidos através dos métodos LDC e OLTC por meio das simulações realizadas.

TABELA 3. Valores de *Tap's* obtidos através de simulação pelo Método LDC. (Autoria Própria)

<i>Carga</i>	<i>Método LDC</i>		
	<i>Ta</i>	<i>Tb</i>	<i>Tc</i>
$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 2500\angle 25.84 \\ 2000\angle 31.79 \\ 1500\angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$	10	4	2
$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 1000\angle 25.84 \\ 1000\angle 31.79 \\ 1000\angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$	5	5	1
$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 200\angle 25.84 \\ 300\angle 31.79 \\ 400\angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$	3	4	0
$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 3000\angle 25.84 \\ 3500\angle 31.79 \\ 4000\angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$	8	10	7

TABELA 4. Valores de *Tap*'s obtidos através de simulação pelo Método OLTC. (Autoria Própria)

Carga	Método OLTC		
	<i>Ta</i>	<i>Tb</i>	<i>Tc</i>
$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 2500 \angle 25.84 \\ 2000 \angle 31.79 \\ 1500 \angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$	10,352	4,096	1,888
$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 1000 \angle 25.84 \\ 1000 \angle 31.79 \\ 1000 \angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$	4,816	4,608	0,928
$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 200 \angle 25.84 \\ 300 \angle 31.79 \\ 400 \angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$	3,168	4,16	0,24
$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 3000 \angle 25.84 \\ 3500 \angle 31.79 \\ 4000 \angle 18.19 \end{bmatrix} \text{ kVA}$	7,584	10,416	7,168

Por meio dos valores dos *tap*'s simulados apresentados nas Tabelas 3 e 4 é possível inferir a equivalência em termos de simulação dos algoritmos de ambos os reguladores para o sistema teste utilizado. Uma vez que em todas as simulações realizadas, para cargas com diferentes valores, os *tap*'s do método OLTC, utilizando em sistemas de transmissão, apresentaram valores idênticos aos simulados por meio do método LDC, método exclusivo em sistemas de distribuição.

5. CONCLUSÃO

Por meio do referido trabalho, foi possível provar em termos de simulação, através do uso de *scripts* de programação e um sistema teste simples, a equivalência entre os métodos *On-Load Tap Charger* e *Line Drop Compensator*. Tal equivalência demonstra a viabilidade de estudos aprofundados em algoritmos de fluxo de carga.

Toma-se como exemplo, sistemas do IEEE de distribuição. Uma vez provada a equivalência dos métodos OLTC e LDC, tais sistemas podem ser simulados usando o clássico método de Newton Raphson, tendo em vista que a justificativa de sua não simulação era justamente a falta de um algoritmo LTC para sistemas de distribuição.

Todavia, faz-se necessário o aperfeiçoamento de simulações em sistemas testes de maior magnitude a fim a de verificar a equivalência em questão, bem como a implicância delas nos referidos sistemas.

REFERÊNCIAS

- [1] PADILHA, L. N. Análise Comparativa de Estratégias para Regulação de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geradores Distribuídos. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. 122 f.
- [2] SPATTI, D. H. Sistema Inteligente para controle de relés reguladores de tensão. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. 77 f.
- [3] KERSTING, W. H. *Distribution System Modeling and Analysis*, 3rd ed.; Editora: Crc Press, Las Cruces, Novo México, 2012; 450 p.
- [4] PONTES, B. C. Simulação Estática e Dinâmica do Controle de Tensão por LTC e Compensador Estático. Dissertação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. 194 f.
- [5] ALMEIDA, F. C. B. Avaliação do Desempenho de Dispositivos de Controle e Modelagem de Carga a Partir de Regiões de Segurança Estática. Dissertação, Universidade Federal de Juíz de Fora, Juíz de Fora, 2011. 195 f.
- [6] USIDA, W. F. Controle Fuzzy para Melhoria do Perfil de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação, Escola de Engenharia – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. 143 f.

- [7] POWELL, L. *Power System Load Flow Analysis*. 2nd ed.; Editora: Mcgraw Hill Professional, EUA, 2005.
- [8] FELBER, L. A. et al. Regulação de Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica. Em Anais do IEEE/PES TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE & EXPOSITION (T&D), Nova Orleans, EUA, 2010; IEEE: Nova Orleans, EUA, 2010; p. 1 - 7.
- [9] FELBER, L. A. Regulação de Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010. 137 f.