

# EFICIÊNCIA E REGULAÇÃO DE TRANSFORMADORES UTILIZANDO ARITMÉTICA DE INTERVALOS

Guilherme C. A. Tolentino, Elisabete C. Oliveira, Bruna Beatriz S. Silva, José R. Camacho

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica

Núcleo de Pesquisa e Extensão em Fontes Alternativas de Energia, Uberlândia-MG,

e.mail: guilhermecostagca@gmail.com, beteenge@gmail.com, brunabeatriz.ufu@gmail.com, jr.camacho@ufu.br

**Resumo** – Levando-se em conta que tensões, correntes e todos os parâmetros utilizados em engenharia se situam dentro de determinados intervalos; a análise do rendimento e da regulação com o uso de métodos computacionais, sob este ponto de vista, é de grande importância para a análise de desempenho dos transformadores e do impacto produzido por variações dentro destes intervalos. Para isso se faz esta análise com o objetivo final de utilizar estes equipamentos dentro de suas respectivas especificações. A aritmética de intervalo além de oferecer os resultados pode oferecer também qual é a precisão dos mesmos. Desse modo, por meio de simulações feitas em software de matemática computacional, aplica-se a Aritmética de Intervalos (AI) para a análise gráfica dos intervalos obtidos através de diferentes métodos de cálculo para a determinação de índices de desempenho. Índices estes que são o rendimento e a regulação dos transformadores, de modo a compará-los com seus valores especificados nas normas.

**Palavras-Chave** - Aritmética de intervalos, rendimento, regulação, transformadores.

## EFFICIENCY AND REGULATION OF TRANSFORMERS USING INTERVAL ARITHMETICS

**Abstract** – Taking into account that voltages, currents, and all parameters used in engineering lie within certain intervals; the analysis of efficiency regulation using computational methods under this point of view is of great importance in analyzing the performance of transformers and the impact produced by variations within these ranges. With this purpose the analysis is made with the ultimate goal of using these devices within their respective specifications. Interval arithmetic provides the results but can also provide what is the accuracy of such calculation method. Thus, by means of simulations through computing mathematical software, it is applied Interval Arithmetic for the graphical analysis of intervals defined by different computation methods for the determination of performance indices. These indices are the efficiency and regulation of transformers, in order to compare them with the values specified in the standards.

**Keywords** - Interval Arithmetic, efficiency, regulation, transformers.



X CEEL - ISSN 2178-8308  
24 a 28 de setembro de 2012  
Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

## NOMENCLATURA

|        |                               |
|--------|-------------------------------|
| AI     | Aritmética de intervalos.     |
| Reg%   | Regulação de transformadores. |
| $\eta$ | Rendimento.                   |

## I. INTRODUÇÃO

O crescimento no consumo de energia elétrica em diferentes regiões e a implantação de sistemas interligados, que contribuem para maior confiabilidade na transmissão de energia, traz como consequência um aumento no comprimento das linhas de transmissão, ocasionando em maiores perdas. De forma a aumentar a eficiência para o transporte de energia em corrente alternada utiliza-se de transformadores que são máquinas capazes de modificar os níveis de tensão, o que reduz significativamente as perdas do sistema. Além disso, como outra finalidade, essas máquinas também atuam como abaixadores de tensão, o que possibilita distribuir energia ao consumidor com maior segurança.

Os transformadores são máquinas capazes de transformar energia elétrica em energia elétrica em sua saída sem alterar suas características alterando apenas os níveis de tensão. São de construção relativamente simples, se comparados a outras máquinas elétricas. A determinação do bom desempenho dos mesmos está vinculada à escolha daqueles que apresentem um rendimento mais alto e uma baixa regulação e pode ser feita utilizando-se métodos computacionais.

A Aritmética de Intervalos é um método que fornece ao projetista, além dos resultados dos cálculos, o grau de confiança que se pode ter em uma determinada série de operações executadas. Este é um modelo de cálculo no qual cada valor real pode ser representado por um intervalo, entre um valor máximo e um mínimo, que garante conter o valor real. Levando-se em conta a precisão, as aproximações e os arredondamentos da matemática computacional a aritmética de intervalos é uma ferramenta muito utilizada por cientistas e projetistas na área de tecnologia. Estes recursos, entretanto, devem ser tratados com muito cuidado, sempre levando em consideração as aproximações e a quantidade de Algarismos significativos. A importância desta discussão pode ser questionada quando o número de operações é pequeno, ou no caso de experimentos de menor escala ou que não tenham exigência de grande precisão. Mas mesmo nestes casos a AI introduz informação adicional quando comparada com a aritmética convencional. Em grandes projetos, onde o número de operações matemáticas é muito grande, a precisão dos números tem a sua importância bastante aumentada. O número de Algarismos significativos passa a tornar-se de

importância fundamental nos cálculos iterativos em grande escala. O intuito neste caso é aumentar a precisão para que os resultados dos cálculos forneçam a segurança desejada ao projetista.

A utilização de um método computacional para a determinação da regulação e do rendimento de transformadores possibilita ao projetista avaliar o melhor caminho para se determinar o rendimento e a regulação dos transformadores, de forma rápida e precisa, já que essas características da máquina podem ser encontradas utilizando parâmetros diferentes.

## II. TRANSFORMADORES

Os transformadores são formados basicamente por enrolamentos, no lado primário e secundário, e por um núcleo de ferro. São máquinas elétricas estáticas, não possuem partes móveis, o que faz com que as perdas sejam concentradas no núcleo de ferro, nas partes metálicas, nos condutores elétricos e no inevitável efeito de dispersão do fluxo magnético.

### A. Rendimento

O rendimento dos transformadores está associado à sua eficiência. Normalmente eles apresentam alto rendimento quando comparado às outras máquinas elétricas, por serem estáticas e assim não apresentarem perdas mecânicas por atrito e ventilação.

1) Perdas - As perdas em um transformador são concentradas no ferro e nos enrolamentos, que são normalmente de cobre ou alumínio. As perdas no cobre/alumínio são devido ao efeito Joule e no ferro podem ser de dois tipos: por histerese ou por correntes parasitas. A perda por histerese está relacionada à qualidade do material magnético, quanto mais estreito o ciclo de histerese, e quanto mais fina a laminação das chapas de material magnético menores são as perdas.

2) Cálculo - O cálculo do rendimento do transformador pode ser feito relacionando-se a potência de saída a de entrada, como mostrado na fórmula a seguir:

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{ent}} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

$P_{ent}$  - Potência de entrada.

$P_{saída}$  - Potência de saída.

$\eta$  - Rendimento instantâneo do transformador em porcentagem.

Ao se considerar um transformador trifásico como uma tensão constante no secundário  $U_2$ , uma corrente  $I_2$  e um fator de potência dado por  $\cos \theta$ , o rendimento é dado por:

$$\eta = \frac{\sqrt{3} * U_2 * I_2 * \cos \theta}{\sqrt{3} * U_2 * I_2 * \cos \theta + P_j + P_0} * 100\% \quad (2)$$

Onde:

$U_2$  - Tensão nominal de linha no secundário.

$I_2$  - Corrente de linha no secundário.

$\cos \theta$  - Fator de potência.

$P_j$  - Perdas no cobre.

$P_0$  - Perdas no ferro.

Pode-se calcular o rendimento dado pela fórmula:

$$\eta = \frac{\sqrt{3} * U_2 * I_{2n} * \cos \theta * f_c}{\sqrt{3} * U_2 * I_{2n} * \cos \theta + P_{jn} * f_c^2 + P_0} * 100\% \quad (3)$$

Onde:

$U_2$  - Tensão nominal de linha no secundário.

$I_{2n}$  - Corrente nominal de linha no secundário.

$P_{jn}$  - Perdas nominais no cobre.

$f_c$  - fator de carga.

O fator de carga representa o carregamento do transformador e é calculado pela relação entre a corrente de carga e a corrente nominal,

### B. Regulação

A regulação de um transformador consiste na diferença das tensões no terminal secundário quando este está sem carga com a tensão alterada pelo acréscimo de carga. A mudança na tensão do secundário quando este tem uma carga acontece devido à queda de tensão nas resistências e nas reatâncias de dispersão dos enrolamentos, em outras palavras devido à queda de tensão na impedância do transformador.

A regulação pode ser positiva ou negativa e depende também do tipo de carga (indutiva ou capacitiva) que é alimentada pelo transformador.

1) Cálculo - Para o cálculo da regulação relaciona-se normalmente a diferença entre as tensões com e sem carga, com a tensão com carga, como mostrado a seguir:

$$Re\ g\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_2} * 100\% \quad (4)$$

Onde:

$U_{20}$  - Tensão os terminais do secundário a vazio.

$U_2$  - Tensão nos terminais do secundário com carga.

Pode se determinar a regulação por meio de um estudo analítico que se baseia na consideração do transformador como uma impedância interna referida ao secundário e na representação e análise de diagramas fasoriais. A regulação passa a ser determinada por valores de corrente de fase, impedâncias e ângulo da impedância da carga variável, obtendo a seguinte expressão:

$$Re\ g\% = \frac{R_2 * I_{2f} * \cos \phi_c + X_2 * I_{2f} * \text{sen} \phi_c}{U_{2f}} * 100\% \quad (5)$$

Onde:

$R_2$  - Resistência referida ao secundário.

$X_2$  - Reatância referida ao secundário .

$\phi_c$  - Ângulo de impedância da carga.

$I_{2f}$  - Corrente de fase no secundário.

$U_{2f}$  - Tensão de fase referida ao secundário.

Por meio de manipulações matemáticas, a regulação pode ser determinada utilizando-se dos valores do fator de carga e valores de impedância percentual, como o mostrado a seguir:

$$\text{Re } g\% = f_c * Z\% * \cos(\phi_i - \phi_c) \quad (6)$$

Onde:

$Z\%$  - Impedância percentual do transformador.

$\phi_i$  - Ângulo de impedância interna do transformador.

### III. ARITMÉTICA DE INTERVALOS

Na AI um número real ou um intervalo é representado por um par  $[a; b]$  de números reais, onde este par representa a tolerância máxima e mínima de um número ou um intervalo de números reais  $a \leq x \leq b$ . Por definição, cada número é representado na AI por um intervalo de valores. Desta forma, as operações matemáticas elementares precisam ter nova definição para poderem ser utilizadas em matemática computacional.

Um intervalo  $[a; b]$  tem natureza dual, porque é representado por um par de números que também representa um conjunto  $[a; b] = \{x: a \leq x \leq b\}$  de valores aceitos para a sua representação numérica [2]. Por exemplo, um resistor comercial de  $1500\Omega \pm 1\%$  pode ter um valor qualquer entre 1485 e 1515, este resistor seria representado pelo par  $[a; b] = [1485; 1515] \Omega$ .

É possível, portanto programar um computador para fazer cálculos algébricos elementares utilizando a AI e fornecer como resposta um intervalo. Neste intervalo estará a faixa de valores possíveis para a resposta, ou mesmo a resposta correta e a margem de erro superior e inferior para os cálculos em questão. Na AI inicia-se portanto pelos cálculos básicos da matemática definidos como se segue [3],[5]:

- soma de dois números ou intervalos:

$$[a; b] + [c; d] = [a + c; b + d] \quad (7)$$

- subtração de dois números ou intervalos:

$$[a; b] - [c; d] = [a - d; b - c] \quad (8)$$

- produto de dois números ou intervalos:

$$[a; b] * [c; d] = [\min(ac, ad, bc, bd); \max(ac, ad, bc, bd)]. \quad (9)$$

- divisão de dois números ou intervalos:

$$[a; b] / [c; d] = [\min(a/c, a/d, b/c, b/d); \max(a/c, a/d, b/c, b/d)] \quad (10)$$

$$1/[a; b] = [1/b; 1/a]. \quad (11)$$

Para trabalhar com aritmética de intervalos em engenharia é necessário que as funções trigonométricas sejam calculadas com aritmética compatível com as quatro operações e restrições descritas acima. Os pares entre colchetes  $[a; b]$  significam os intervalos de  $a$  até  $b$  inclusive, com  $a \leq b$ .

Desta forma o cálculo de funções trigonométricas elementares é executado a partir de séries cujos critérios de cálculo são mostrados a seguir.

Funções trigonométricas, como o seno e o cosseno, são necessárias para o cálculo do rendimento e da regulação em transformadores utilizando aritmética de intervalos, com isso, as funções foram desenvolvidas na linguagem C e posteriormente no Octave.

As funções *coseno* e *seno* foram calculados através do método de séries, e uma forma simples de cálculo é apresentada com a utilização da série de MacLaurin.

Inicialmente foi analisada a série de Taylor com sua forma reduzida na Eq.(12), e forma ampliada na Eq. (13), para esta fórmula é necessário supor que  $a$  é igual à zero para se calcular as funções seno e cosseno, pela série de Taylor. Então ao se supor que  $a$  é igual à zero, temos uma formulação particular da série de Taylor que é a série de MacLaurin, sua forma reduzida está mostrada em (14) e a forma ampliada em (15).

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a) \cdot (x-a)^n}{n!} \quad (12)$$

$$f(x) = f(a)(x-a)^0 + \frac{f'(a)(x-a)^1}{1!} + \frac{f''(a)(x-a)^2}{2!} + \dots \quad (13)$$

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0) \cdot (x)^n}{n!} \quad (14)$$

$$f(x) = f(0)(x)^0 + \frac{f'(0)(x)^1}{1!} + \frac{f''(0)(x)^2}{2!} + \frac{f'''(0)(x)^3}{3!} + \dots \quad (15)$$

Outra forma encontrada para calcular o seno e o cosseno foi através da serie da função 'e<sup>x</sup>'.

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1(x)^n}{n!} \quad (16)$$

$$e^{ix} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1(ix)^n}{n!} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x)^{2k}}{(2k)!} + i \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x)^{2k+1}}{(2k+1)!} \quad (17)$$

$$e^{ix} = \cos(x) + i \text{sen}(x) \quad (18)$$

A partir dai se obtém a série do cosseno na forma reduzida, Eq. (19) e na ampliada, Eq. (20), e do seno na forma reduzida, Eq.(21), e na ampliada, Eq.(22):

$$\cos(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x)^{2k}}{(2k)!} \quad (19)$$

$$\cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \frac{x^8}{8!} - \frac{x^{10}}{10!} + \dots \quad (20)$$

$$\text{sen}(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x)^{2k+1}}{(2k+1)!} \quad (21)$$

$$\text{sen}(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \frac{x^9}{9!} - \frac{x^{11}}{11!} + \dots \quad (22)$$

Para os cálculos, na AI é utilizado o ângulo em radianos, a tolerância é aplicada no ângulo informado pelo usuário, para o cálculo são usadas as equações básicas da AI. Cada série é calculada iterativamente, utilizou-se 100 iterações para cada função, com o objetivo de se obter um intervalo apropriado para os cálculos da regulação e do rendimento de transformadores.

No algoritmo tanto no cálculo da função *seno* como no da função *coseno*, foram criadas duas funções, uma para o cálculo do fatorial em cada iteração usando um laço; e outra para o cálculo do ângulo elevado à sua potencia também

através de um laço no qual o índice é a potencia do número, ou seja, quantidade de vezes que o ângulo será multiplicado por ele mesmo.

Dois algoritmos separados foram criados para o *seno* e para o *coseno*, os dois tem a mesma estrutura descrita no parágrafo anterior. Ambos os algoritmos possuem em cada interação uma chamada de funções do fatorial e de funções potencia para a realização dos cálculos necessários em cada iteração, que finalmente são adicionados formando o resultado final. As únicas diferenças entre as duas últimas funções é que a potencia e fatorial é impar no *seno*, e par no *coseno*.

#### IV. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA AI PARA DETERMINAÇÃO DE RENDIMENTO E REGULAÇÃO

##### 4.1 Rendimento

Em nosso caso a AI será usado para calcular o rendimento do transformador trifásico de 150 kVA, Δ-Y, 13800-220/127 Volts,  $P_{jn} = 1800$  Watts e  $P_0 = 650$  Watts, o transformador em questão apresenta o carregamento diário disposto na Tabela I.

Tabela I – Carregamento diário do transformador.

| Período | Intervalo | Tempo | fc  | fp   |
|---------|-----------|-------|-----|------|
| -       | Horas     | Horas | -   | -    |
| 1       | 00-06     | 6     | 0,3 | 0,95 |
| 2       | 06-09     | 3     | 0,5 | 0,9  |
| 3       | 09-12     | 3     | 0,8 | 0,88 |
| 4       | 12-17     | 5     | 0,7 | 0,9  |
| 5       | 17-20     | 3     | 1,2 | 0,95 |
| 6       | 20-24     | 4     | 0,8 | 0,9  |

As duas equações, reduzida e estendida para o cálculo do rendimento são as equações reduzida (23) e estendida (24) a seguir. Para todos os parâmetros das equações foram supostas tolerâncias respectivamente de  $\pm 1\%$ ,  $\pm 2\%$  e  $\pm 5\%$ .

$$\eta = \frac{E_u}{E_e} \cdot 100 \quad (23)$$

$$\eta = \frac{S_n \cdot \cos \phi \cdot f_c}{S_n \cdot \cos \phi \cdot f_c + P_{jn} \cdot f_c^2 + P_0} \cdot 100 \quad (24)$$

Na Eq. (23)  $E_u$  e  $E_e$  são respectivamente as energias elétricas útil na saída e na entrada para cada intervalo calculadas a partir das Eqs. (25) e (26) em cada período da Tabela I.

$$E_u = S_n \cdot fp \cdot f_c \cdot \Delta t \quad (25)$$

$$E_e = S_n \cdot fp \cdot f_c \cdot \Delta t + P_{jn} \cdot f_c^2 \cdot \Delta t + P_0 \cdot \Delta t \quad (26)$$

Pelas tabelas II, III e IV com os rendimentos calculados com as expressões reduzida (short) e estendida e com as tolerâncias respectivamente de  $\pm 1\%$ ,  $\pm 2\%$  e  $\pm 5\%$ , pode-se observar o impacto das tolerâncias nos resultados das expressões curta e longa.

Tabela II – Rendimento com tolerâncias de  $\pm 1\%$ .

| Período | Rendimento - short | Rendimento - Estend |
|---------|--------------------|---------------------|
| 1       | [96,1927 100,1186] | [91,0996 105,0846]  |
| 2       | [96,4480 100,3844] | [90,7792 106,6501]  |
| 3       | [96,3752 100,3085] | [90,2593 107,1021]  |
| 4       | [96,4560 100,3927] | [90,7819 106,6650]  |
| 5       | [96,1960 100,1220] | [91,5449 105,2076]  |
| 6       | [96,4111 100,3460] | [90,7385 106,6166]  |

Tabela III – Rendimento com tolerâncias de  $\pm 2\%$ .

| Período | Rendimento - short | Rendimento - Estend |
|---------|--------------------|---------------------|
| 1       | [94,2875 102,1416] | [85,7078 113,1222]  |
| 2       | [94,5378 102,4127] | [84,1382 116,2015]  |
| 3       | [94,4664 102,3354] | [83,1455 117,1604]  |
| 4       | [94,5456 102,4213] | [84,1168 116,1965]  |
| 5       | [94,2907 102,1451] | [84,8356 112,0511]  |
| 6       | [94,5016 102,3736] | [84,0005 116,0373]  |

Tabela IV – Rendimento com tolerâncias de  $\pm 5\%$ .

| Período | Rendimento - short | Rendimento - Estend |
|---------|--------------------|---------------------|
| 1       | [88,7897 108,4661] | [69,2356 139,0276]  |
| 2       | [89,0254 108,7541] | [65,4359 147,8556]  |
| 3       | [88,9581 108,6719] | [63,6761 151,6989]  |
| 4       | [89,0328 108,7631] | [65,4253 147,9149]  |
| 5       | [88,7923 108,4693] | [69,1672 139,2057]  |
| 6       | [88,9913 108,7125] | [65,3911 147,8558]  |

Assim para uma melhor visualizar os dados dispostos nas tabelas e montamos dois gráficos: calculo do rendimento do transformador (short), na Fig. 1, que é calculado pela utilização a fórmula reduzida e o rendimento (Estend), que é o rendimento utilizando o calculo “estendido”, Fig. 2, ou seja, a formula que depende de mais variáveis e onde são necessárias mais operações algébricas, com ambas utilizando a AI.

Figura 1 – Resultados com a expressão reduzida.

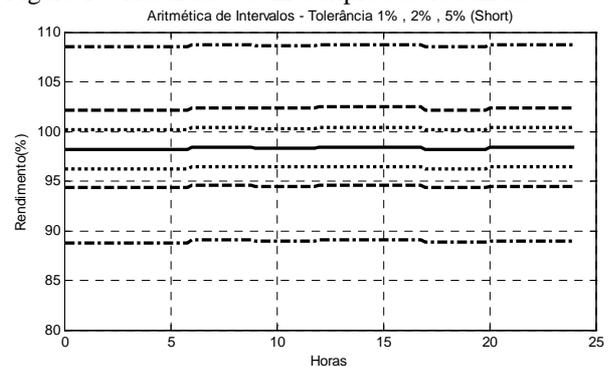
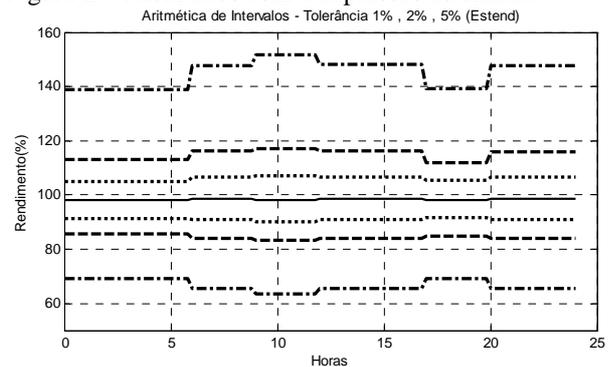


Figura 2 – Resultados com a expressão estendida.



Acima temos dois gráficos nas Figs. 1 e 2, na qual o eixo das ordenadas representa o rendimento e o eixo das abscissas representa o tempo de funcionamento do transformador no ensaio (0 a 24 horas). Para os ambos os gráficos temos que o segmento de linha preto representa o rendimento do transformador no ensaio sem a utilização da aritmética de intervalos, ou seja, com a utilização da aritmética convencional. Já os demais segmentos representam o rendimento com a utilização da aritmética de intervalos e suas respectivas tolerâncias. Os segmentos pontilhados são 1% de tolerância, tracejados são para 2% e traço-pontilhado são para 5%.

Tabela V – Desvios nos resultados para tolerâncias de 1% nos parâmetros.

| 1% de Tolerância |           |           |
|------------------|-----------|-----------|
| Período          | Short (%) | Extend(%) |
| 1                | 1,9999    | 6,9218    |
| 2                | 1,9999    | 8,0388    |
| 3                | 1,9999    | 8,4214    |
| 4                | 1,9999    | 8,0442    |
| 5                | 1,9999    | 6,9441    |
| 6                | 1,9999    | 8,0454    |

Tabela VI – Desvios nos resultados para tolerâncias de 1% nos parâmetros.

| 2% de Tolerância |          |           |
|------------------|----------|-----------|
| Período          | Short(%) | Extend(%) |
| 1                | 3,9984   | 13,7879   |
| 2                | 3,9984   | 16,0045   |
| 3                | 3,9984   | 16,9815   |
| 4                | 3,9985   | 16,0148   |
| 5                | 3,9985   | 13,8229   |
| 6                | 3,9985   | 16,0184   |

Tabela VII – Desvios nos resultados para tolerâncias de 1% nos parâmetros.

| 5% de Tolerância |          |           |
|------------------|----------|-----------|
| Período          | Short(%) | Extend(%) |
| 1                | 9,975    | 33,5114   |
| 2                | 9,975    | 41,2099   |
| 3                | 9,975    | 40,8696   |
| 4                | 9,975    | 38,6658   |
| 5                | 9,975    | 33,6121   |
| 6                | 9,975    | 38,671    |

Calculamos o erro aliado às tolerâncias descritas e montamos as Tabelas V, VI e VII, onde podem ser observadas as tolerâncias para os resultados a partir das duas fórmulas de rendimento.

O cálculo dos desvios percentuais nos resultados erro foi obtido pela razão entre os limites superior e inferior pelo ponto médio do intervalo. E os resultados obtidos estão descritos nas Tabelas V, VI e VII. Analisando as tabelas é possível observar que para as diversas tolerâncias quando calculado o rendimento com a forma mais simples a tolerância do resultado na forma reduzida dobra de valor. Já na expressão estendida para a tolerância igual a 1% a tolerância do resultado é de cerca de 7 a 8 vezes maior. Isto se repete também para as tolerâncias de 2% e 5%.

Então para mostrar com maior clareza os resultados dos desvios para o cálculo do rendimento do transformador,

produzimos os gráficos das Figuras (3) a (5), que representam o rendimento do transformador utilizando o cálculo reduzido tanto para o cálculo analítico (curva média) quanto para a AI (extremos).

Figura 3 – Resultados do cálculo reduzido para 1% de tolerância.

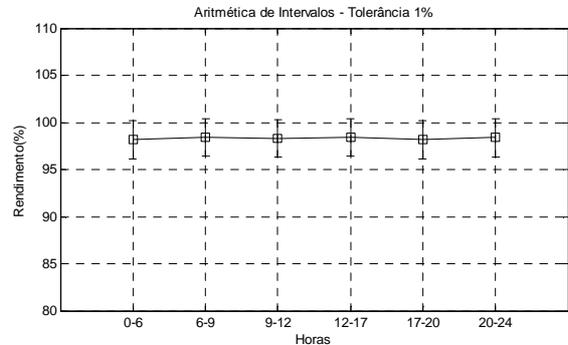


Figura 4 – Resultados do cálculo reduzido para 2% de tolerância.

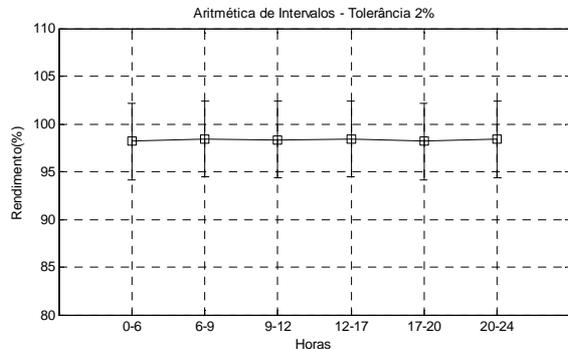
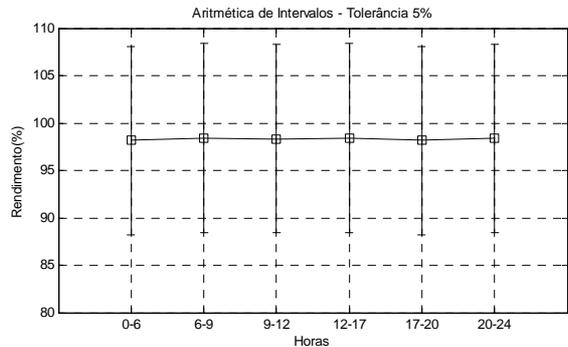


Figura 5 - Resultados do cálculo reduzido para 5% de tolerância.



#### 4.2 Regulação

Levando-se em consideração os dados de carregamento do transformador dados na Tabela I, é calculada a regulação para os mesmos períodos de carregamento através do cálculo tradicional, é montada a Tabela VIII.

Com os períodos de funcionamento do transformador e o cálculo da regulação para cada um deles, decidiu-se escolher um período qualquer para que seja efetuado o cálculo utilizando a AI.

Aplicando a AI no primeiro período de carregamento, que corresponde ao funcionamento do transformador de 00 hr às 06 hs. Utiliza-se as duas formas de cálculo mostradas anteriormente: a “short” e a “extend”. Em primeira instância

utiliza-se a expressão da Eq. (6) e a seguir a extend mostrada na Eq. (5).

Tabela VIII – Regulação do transformador.

| Período | Regulação % |
|---------|-------------|
| 1       | 0,799564441 |
| 2       | 1,538808586 |
| 3       | 2,586166635 |
| 4       | 2,154332021 |
| 5       | 3,085283969 |
| 6       | 2,462093738 |

Monta-se então as tabelas IX, X e XI aplicando-se a AI para a regulação no Período 1 aplicando tolerâncias para as variáveis de respectivamente 1%, 2% e 5%, como mostrado abaixo.

Table IX – Regulação com tolerância de 1%;

| Período | Reg, % - Short      | Reg, % - Extend     |
|---------|---------------------|---------------------|
| 1       | [0,665652 0,876482] | [0,672900 0,799200] |

Table X – Regulação com tolerância de 2%;

| Período | Reg, % - Short      | Reg, % - Extend     |
|---------|---------------------|---------------------|
| 1       | [0,558977 0,981677] | [0,615500 0,868300] |

Table XI – Regulação com tolerância de 5%;

| Período | Reg, % - Short      | Reg, % - Extend     |
|---------|---------------------|---------------------|
| 1       | [0,228058 1,304180] | [0,460000 1,105700] |

Tendo-se em vista as regulações aplicadas com as devidas tolerâncias monta-se assim a Tabela XII para se observar os desvios relativos aos cálculos a partir das tolerâncias adotadas para o cálculo com aritmética de intervalos.

Tabela XII – Desvios relacionados à regulação no período 1.

| -  | Short(%)  | Extend(%) |
|----|-----------|-----------|
| 1% | 13,666788 | 8,591998  |
| 2% | 27,401030 | 17,037336 |
| 5% | 69,758354 | 41,236586 |

## V. CONCLUSÕES

É imediata a conclusão de que a quantidade de operações que se realiza para obter um determinado resultado influencia na tolerância do resultado de forma significativa. O mesmo acontece com a tolerância de cada parâmetro, quando maior a tolerância maior a tolerância final para o resultado obtido.

O cálculo do rendimento com a versão reduzida da fórmula utilizando a aritmética de intervalos possui resultado

superior, com uma menor tolerância associada ao resultado. Indicando, portanto maior precisão nas operações.

No cálculo da regulação observa-se também que os desvios de ambos os cálculos aumentam com o crescimento das tolerâncias aplicadas. Ao contrário do que acontece com o rendimento, vemos acima na Tabela XII que o crescimento da tolerância para o cálculo “Short” o desvio aumentou mais que no cálculo “Extend”, isto se deve ao fato de o cálculo “Short” possuir em sua fórmula o cosseno da diferença de dois ângulos; esta diferença quando aplicada à aritmética de intervalos ocasiona um desvio maior.

Neste caso foram aplicadas tolerâncias para o ângulo da impedância interna do transformador e o ângulo da impedância da carga. Isso transforma o cálculo “Extend”, onde se obtém uma precisão maior, em alguns casos o seu intervalo tem uma menor amplitude devido aos desvios percentuais dos parâmetros serem menores.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU pela infraestrutura utilizada no Laboratório do NUPEA – Núcleo de Pesquisa e Extensão em Energias Alternativas e ao PET–Elétrica por ceder um de seus bolsistas. Este projeto encontra-se em fase inicial de desenvolvimento e não conta com qualquer financiamento externo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Stolfi, L. H. de Figueiredo; “Self Validated Numerical Methods and Applications”; *Brazilian Mathematics Colloquium, IMPA, Rio de Janeiro, Brazil*; 16 pp, July 1997.
- [2] R. E. Moore, R. B. Kearfott, M. J. Cloud. “*Introduction to interval analysis*”, SIAM, United States of America, 2009.
- [3] B. Hayes, “A Lucid Interval”, *American Scientist*, Volume 91, Pages 484-488, November–December 2003.
- [4] B. R. T. Franciosi, “Representação Geométrica de Intervalos”, *PPGC da UFRGS*, pp. 148, Março 1999.
- [5] G.I Hargreaves, “Interval Analysis in MATLAB”, *Numerical Analysis Report*, No. 416, December 2009.
- [6] Cathey, Jimmie J., *Electric machines: Analysis and design applying Matlab*, McGraw-Hill Companies, Nova Iorque, 2001.
- [7] Martignoni, Alfonso, *Transformadores*, Editora Globo, 8ª edição, São Paulo, 1991.
- [8] John J., Winders, Jr., *Power Transformers Principles and Applications*, Marcel Dekker, Nova Iorque, 2002.