

ANAIS DOS TRABALHOS DE DIPLOMA – JULHO/2008
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE DO EFEITO PELICULAR EM CONDUTORES PERCORRIDOS POR
CORRENTES NÃO SENOIDAIS.**

Ricardo Cunha Perez

Gustavo Espagnoli Geraldo Martins

Orientador: Prof.Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu

Co-Orientador: Marcel Fernando da Costa Parentoni

Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE)

Resumo – Este artigo tem como objetivo, primeiramente, analisar o efeito pelicular, ou seja, o aumento de resistência em função da frequência de um sinal de corrente aplicado a um condutor através de medições laboratoriais. Com base nesse comportamento, deve ser feita uma análise comparativa com o resultado obtido na aplicação de uma corrente com forma de onda quadrada, ou seja, não senoidal. O objetivo final é portanto, obter um comportamento da resistência elétrica tanto para situações senoidais de variadas frequências quanto para situações distorcidas.

Palavras-Chave: Resistência Elétrica, Efeito pelicular, Medição laboratorial.

I. INTRODUÇÃO

Na sociedade atual a energia elétrica é de vital importância. Assim, vem a necessidade cada vez maior de um fornecimento ininterrupto e de qualidade.

Cargas não lineares provocam a circulação de correntes elétricas não senoidais em equipamentos instalados entre a rede de suprimento de energia elétrica e as próprias cargas.

Devido ao efeito pelicular, as perdas por efeito Joule crescem nestes equipamentos, exigindo que os mesmos sejam sobredimensionados para fornecer uma mesma potência ativa. O fator de sobredimensionamento baseia-se no aumento das perdas provocado pela circulação de harmônicos de corrente conjugados com a correção do valor da resistência devido ao efeito pelicular para cada frequência do harmônico correspondente. Em outras palavras, as perdas em condutores percorridos por correntes distorcidas são usualmente calculadas através da soma aritmética das perdas resultantes de cada

harmônico de corrente, corrigindo-se a resistência devido ao efeito pelicular.

Este método explicitado acima admite que a superposição é válida, em efeito final, tanto para os harmônicos de corrente quanto para o efeito pelicular. Porém, tal validade não é um fato totalmente sedimentado. Desta maneira, o dimensionamento de equipamentos elétricos pode estar sendo feito de maneira não adequada, implicando em custos desnecessariamente elevados.

Frente a tal conjuntura, o objetivo deste trabalho consiste em realizar uma avaliação prática do efeito pelicular em condutores percorridos por correntes senoidais de várias frequências e posteriormente, comparar os valores de resistência destes condutores na aplicação de correntes senoidais e não senoidais de mesma frequência fundamental.

II. O EFEITO PELICULAR

A resistência aparente de um condutor é sempre maior na presença de uma corrente alternada em relação à contínua. O fluxo magnético variável no tempo criado por uma corrente alternada interage com o condutor, gerando uma força contra-eletromotriz, a qual tende a reduzir a corrente passante no mesmo. A parcela central do condutor é afetada pela maior parte das linhas de força, porém quanto mais se aproxima da superfície, menos linhas de força atingem tais regiões. A força eletromotriz produzida pela indutância própria varia tanto em magnitude como em fase através de cada seção transversal do condutor, sendo maior no centro e diminuindo à medida que se aproxima da superfície. Portanto, a maior parcela de corrente tende a passar nesta região por apresentar uma menor oposição à passagem de corrente, ou em outras palavras, uma menor força contra-eletromotriz.

Para que tal fenômeno seja fisicamente interpretado, basta apenas imaginar a seção transversal do condutor composta por infinitos anéis, cada um com um diâmetro. Conseqüentemente, o condutor é formado por infinitos tubos cilíndricos de diferentes raios e resistências para correntes alternadas, um dentro do outro. Observa-se além disso que, quanto mais externo é o tubo, menor será sua resistência. De acordo com tal análise, poder-se-ia dizer que o condutor é composto de infinitas resistências em paralelo e conseqüentemente, parcelas de correntes maiores irão passar por resistências menores, ou seja, através dos tubos externos.

Esse efeito explicitado acima é chamado de efeito pelicular ou, em inglês, “*skin effect*”. Ademais, a intensidade deste efeito varia com a frequência, tamanho, forma e espessura do condutor, porém é independente da magnitude da corrente passante.

Resumidamente, entender este fenômeno significa determinar a distribuição da densidade de corrente na seção do condutor, seja a forma de onda senoidal, transitória ou distorcida.

Por fim, são citadas apenas as conseqüências desta densidade não uniforme de corrente, que são: o aumento da resistência aparente e conseqüentemente das perdas por efeito Joule do condutor.

III. REVISÃO DA LITERATURA

Foi realizada uma revisão da literatura com o intuito de se obter as principais formulações propostas para a quantificação do efeito pelicular para que, posteriormente, sejam analisadas através das medições feitas no Laboratório de Medição, Qualidade e Proteção (LQMP) do QGEE.

No trabalho de Gatous e Pissolato Filho [1]. A formulação e o modelo do circuito equivalente são obtidos da exata solução da equação de onda de Maxwell de um campo elétrico excitando um condutor cilíndrico sólido na direção de propagação. O resultado final é a admitância interna levando-se em conta o efeito pelicular. A critério de exemplificação prática, é apresentado na figura 01 o gráfico da resistência em função da frequência de um condutor cilíndrico de cobre puro a 20 °C com condutividade $\sigma = 5,88 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$.

Pode-se observar que para raios $R = 1 \text{ mm}$ e $R = 10 \text{ mm}$, a resistência parte de seu valor DC e se mantém constante até 10^4 Hz e 10^2 Hz respectivamente. Além disso, quanto menor for o raio do condutor, mais alta deverá ser a frequência para sensibilizar o valor da resistência. Este artigo conclui portanto, que com o aumento da frequência a resistência aumenta, a indutância interna diminui, porém a impedância também aumenta na mesma proporção que a resistência, sendo todas essas variações lineares e proporcionais à raiz quadrada da frequência.

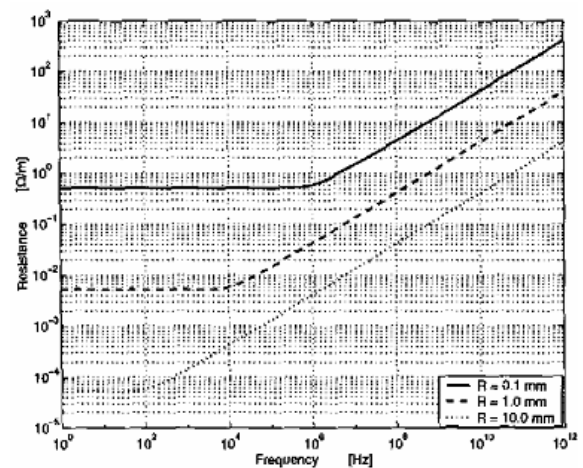


Figura 01 – Resistência efetiva do cobre a 20 °C

Para comprovar a influência do raio do condutor na resistência frente ao aumento de frequência, Mingli [2], utilizou as funções de Bessel para calcular a impedância interna de condutores cilíndricos contínuos e tubulares, levando-se em consideração o efeito pelicular. A contribuição deste artigo consiste na comprovação de que quanto maior é a espessura do tubo, mais inclinada é curva, ou seja, mais rapidamente a resistência aumenta com a frequência. Para uma maior sensibilidade na análise, é apresentado na figura 02 o gráfico correspondente.

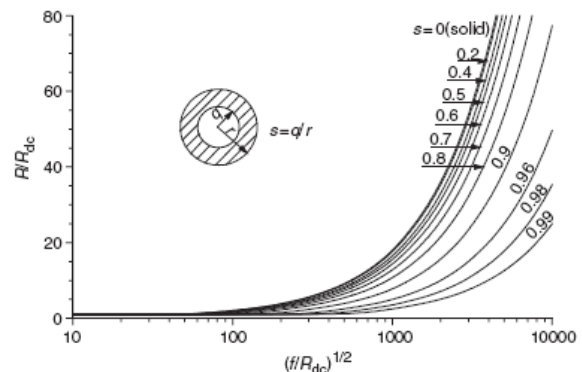


Figura 02 – Comportamento da resistência de condutores cilíndricos tubulares

Além disso, de acordo com [3], a resistência efetiva de um condutor cilíndrico na presença de uma corrente alternada senoidal de uma dada frequência (R_{ac}) é:

$$R_{ac} = k \cdot R_{dc} \quad (1)$$

Onde R_{dc} é a resistência em corrente contínua em Ω/km à temperatura de trabalho, k é chamado de coeficiente pelicular e vem dado em uma tabela em função de x , o qual na prática é calculado por:

$$x = 0,050136 \sqrt{\frac{f \cdot \mu}{R_{dc}}} \quad (2)$$

Outra formulação aparentemente muito parecida com a apresentada acima está presente em uma nota de cálculo da Pirelli [4]. Nesta, a resistência R_{ac} é calculada através da soma de R_{dc} com um delta devido ao efeito pelicular, o qual para condutores redondos é o resultado da multiplicação de R_{dc} por um $F(x)$ tabelado em função de x , onde x neste caso, é dado por:

$$x = 0,05013 \sqrt{\frac{f \cdot K_s}{R_{dc}}} \quad (3)$$

Onde K_s para os condutores em questão, é igual a 1.

Além destas referências supracitadas, outro trabalho analisado foi o dos autores Sérgio L. M. Berleze e René Robert [5]. Neste trabalho são apresentados gráficos nos quais pode ser constatado o aumento da resistência devido ao efeito pelicular em relação à frequência, como pode ser visto na figura 03:

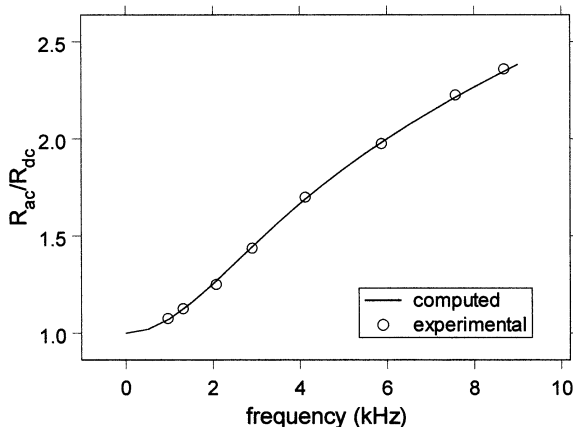


Figura 03 – Comportamento da resistência de condutores cilíndricos quadrados

A curva do gráfico é referente a um condutor de cobre de secção quadrada de lado igual a 5 mm e é baseada a formulação proposta por esse artigo. Além disso, o comportamento encontrado foi comparado com os resultados experimentais publicados por Arnold [6].

Por fim, é explicitado na figura 04 outro gráfico retirado deste mesmo artigo mostrando a distribuição da densidade de corrente com relação às coordenadas x e y em mm referentes à seção transversal quadrada de um condutor de cobre de 10 mm na aplicação de um sinal de frequência única.

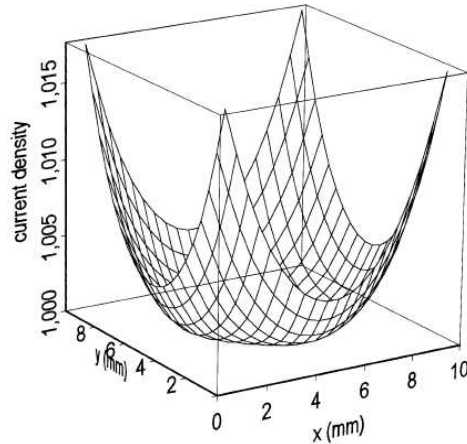


Figura 04 – Distribuição da densidade de corrente em relação à seção transversal

Observa-se que quanto mais se aproxima das extremidades, maior é a densidade de corrente. Ademais, o centro do condutor é o ponto de menor densidade de corrente, comprovando a existência do efeito pelicular.

IV. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

Para validação prática do efeito pelicular, foram feitas várias medições laboratoriais, através da utilização dos seguintes equipamentos:

- Fonte de alimentação com saída em corrente constante (caixa de calibração de relés, marca Omicron);
- Medidor da marca RMS, designado para registrar os valores de tensão, corrente e temperatura;
- Termopar tipo k;
- Transmissor de temperatura com saída analógica de 4 a 20 mA;
- Carga (garrafa térmica, água destilada e uma resistência típica de um chuveiro elétrico);

Para a completa visualização do sistema, é explicitada na figura 05 uma foto da bancada no LQMP do GQEE.

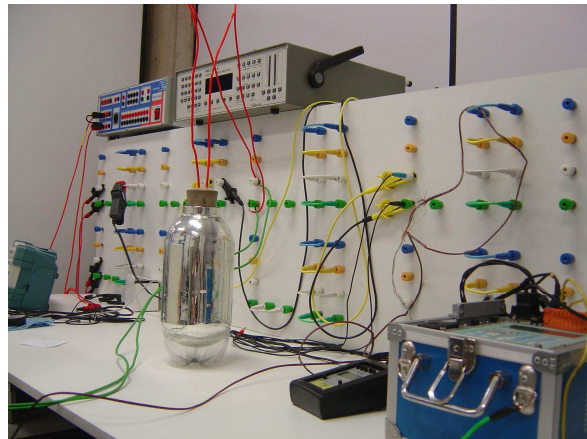


Figura 05 – Bancada de medição no LQMP

Dos equipamentos citados acima, o único que não está visível na foto é o transmissor de temperatura, o qual obtém a tensão do termopar, condiciona esse sinal e apresenta como saída analógica uma corrente de 4 a 20 mA. Este conversor é apresentado na figura 06:

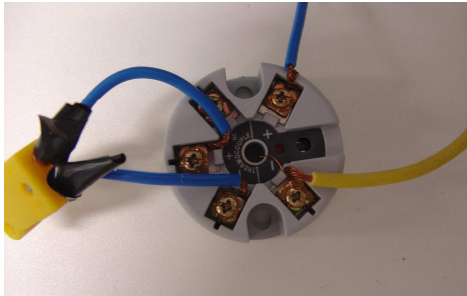


Figura 06 – Transmissor de temperatura

Com o sistema devidamente montado, partiu-se para o processo de medições, objetivando sempre o melhor funcionamento possível.

V. PRIMEIRAS MEDIÇÕES

Nestas primeiras medições, foram realizadas 5 experiências com sinais de corrente senoidais com as respectivas frequências, 60, 120, 180, 240 e 300Hz.

As medições se baseiam nas coletas de dados de temperatura, tensão e corrente a partir do aquecimento de qualquer tipo de material. Neste trabalho serão apresentados os testes utilizando um resistor de chuveiro, bem como outro de níquel-cromo. Primeiramente aplicaram-se sinais de corrente senoidais de diversas frequências. São testes onde o aquecimento do resistor sofre interferência direta de um sinal de frequência única.

Nesta primeira bateria foram realizadas cinco experiências, cada uma com um sinal de corrente senoidal de diferente frequência. A figura abaixo traz o gráfico do aumento da temperatura no tempo, para os cinco sinais injetados. Devido às dificuldades na visualização, são citadas a seguir as frequências e suas respectivas cores: 60 – azul escuro, 120 - vermelho, 180 - amarelo, 240 – azul claro e 300 Hz - verde. Ademais, a temperatura inicial foi aproximadamente 30°C, a final 80°C e a duração média foi de aproximadamente 2,4 horas.

O resultado registrado foi qualitativamente diferente do esperado, uma vez que nem sempre a aplicação de um sinal de maior frequência resultou em um aquecimento mais rápido, haja vista que o objetivo era a identificação do tempo necessário para que os 80°C fosse atingido.

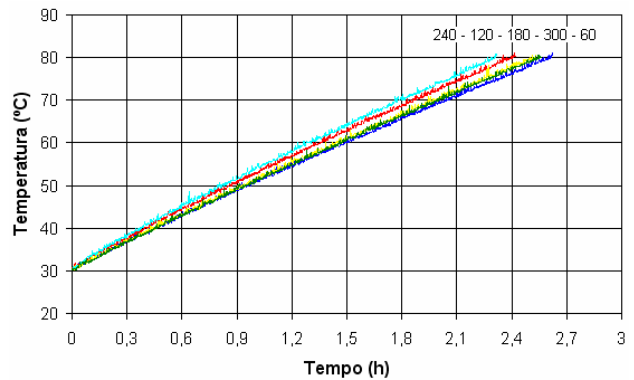


Figura 07 – Temperatura versus tempo

Procurando respostas para esta discrepância, foi notado que para as frequências de 120 e 240 Hz, o volume de água utilizado foi aproximadamente 10% inferior aos demais, acarretando em um aquecimento mais rápido do que o esperado.

Este erro não acarretou em maiores complicações, haja vista a simplicidade da solução. No entanto também foi feito um gráfico da variação de tensão com o tempo e notou-se que para a frequência de 300 Hz a tensão registrada foi maior que para os testes com 120, 180 e 240 Hz. Isto implica que resistência aumentou mais do que a corrente diminuiu. Sabe-se que para ter uma tensão maior com uma corrente menor, a resistência tem de ser relativamente maior. O aumento do valor desta resistência se dá pelo efeito pelicular.

Partindo dos princípios explicitados acima, foram medidos valores de tensão para cada corrente de diferente frequência injetada, sendo o tempo do experimento igual a três minutos, objetivando a manutenção da temperatura. Como pode ser visto na figura abaixo, nota-se que a resistência aumenta com a temperatura e a frequência, que era o comportamento esperado.

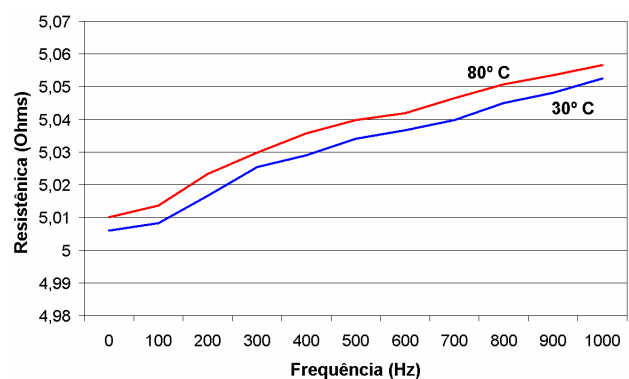


Figura 08 – Resistência versus frequência

Ademais, a resistência em 30°C e em 80°C aumentou, respectivamente, 0,9321 % e 0,9290 % de 0 a 1000 Hz, com base nestes primeiros resultados, tem-se por objetivo que os erros referentes aos volumes de água e a instabilidade da corrente fornecida pela fonte deveriam ser minimizados ao máximo, haja vista a sua interferência representativa nas respostas analisadas. Diante desta

conjuntura, foram feitas alterações no sistema de medição da maneira explicitadas a seguir.

VI. MELHORIAS NO PROCESSO DE MEDIÇÃO

O primeiro procedimento adotado foi o de medir a quantidade de água antes de cada experiência. Além disso, foi avaliada a condição inicial de corrente, uma vez que foram observados diferentes valores de corrente medidos para as diversas situações configuradas. Como a variação de corrente constatada se enquadra na faixa de exatidão garantida pelo fabricante de fonte, adotou-se a estratégia de ajustar o valor inicial de corrente com o auxílio de um medidor de corrente com exatidão de 0,05% (PM3000 – Voltech Instruments).

Outro problema encontrado foi com relação ao processo de transferência de calor por convecção. Foi observado que o conjunto alcançou temperaturas muito elevadas (80°C), o que ocasionava na formação de bolhas entre o resistor e a água. Como solução, esta temperatura foi reduzida para 50°C.

Finalmente, a última mudança antes do começo da segunda bateria de testes consistiu na troca do resistor de chuveiro por um composto de níquel-cromo, conectado da seguinte forma para ser inserido na garrafa térmica, de acordo com a figura 09.



Figura 09 – Resistor de níquel-cromo

VII. SEGUNDA BATERIA DE TESTES

Com o sistema adaptado, realizou-se uma segunda bateria de testes. A curva de aquecimento em função do tempo, para cada situação de corrente, é mostrada na figura abaixo. Para tal, foram utilizados cinco sinais, um DC (amarelo), dois de 60 (um azul escuro e outro vermelho), um de 120 (verde) e por último um de 600Hz (azul claro).

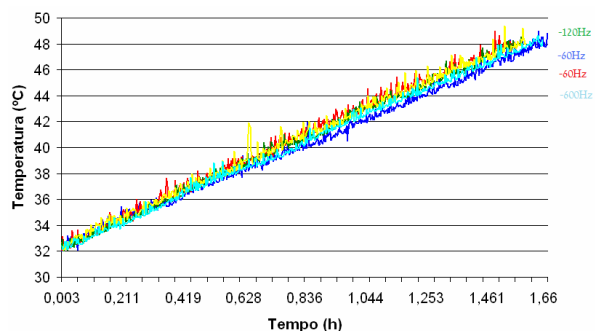


Figura 10 – Temperatura versus tempo

Mais uma vez foram observados alguns comportamentos diferentes do esperado, como por exemplo uma taxa de aquecimento provocada pelo sinal de 600 Hz inferior a taxa provocada pelo sinal de 120 Hz.

Outro fato preocupante é a ocorrência de taxas de aquecimento sensivelmente diferentes para os dois sinais de 60 Hz (curvas azul e vermelha), o que faz com que seja questionada a constituição física do sistema de medição, uma vez que o termopar ficava imerso na água em uma profundidade bem definida, porém não era possível mantê-lo fixo no interior da garrafa, tornando a medição extremamente sensível à distribuição de temperatura na água.

Para sedimentar ainda mais a avaliação dos resultados, as figuras 11 e 12 trazem, respectivamente, o comportamento da tensão e da corrente registradas para cada situação.

Ademais, como pode ser observado na figura 12, o comportamento das correntes fornecidas pela fonte não foi exatamente constante para todas as medições, fato que não era esperado após as melhorias implantadas.

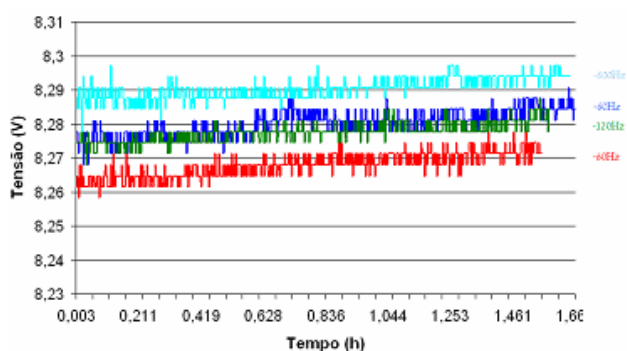


Figura 11 – Tensões registradas durante o aquecimento

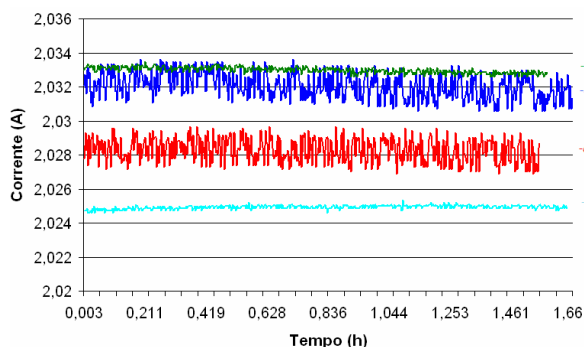


Figura 12 – Correntes registradas durante o aquecimento

Tal gráfico traz a mesma conclusão qualitativa que a anterior já explicitada. Nota-se que, apesar da corrente registrada ser a menor para 600 Hz, a respectiva tensão registrada foi maior do que para as outras frequências. Mais uma vez, como a tensão aumentou substancialmente mais do que a corrente diminuiu, conclui-se que a causa tem de ser o aumento da resistência, mais precisamente, a influência do efeito pelicular.

Devido às limitações dos equipamentos, principalmente na precisão da estabilidade da fonte de corrente, foi feita outra mudança no sistema de medição no sentido de aumentar ainda mais a confiabilidade dos dados e a captação do efeito sob análise.

VIII. NOVO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Optou-se por uma reformulação completa do sistema, principalmente no que diz respeito ao registro da taxa de aquecimento, haja vista a grande influência da posição do termopar dentro da garrafa na obtenção do valor da temperatura. Para tanto, a principal mudança realizada foi a substituição da garrafa térmica por caixas de isopor.

Neste novo sistema, o resistor foi distribuído uniformemente dentro da caixa de isopor, para tanto foi construído um suporte capaz de manter o resistor na mesma posição.

Outra melhoria foi a colocação de três termopares, dois destinados a medir a temperatura do fluido em contato com o resistor, que neste caso é o ar, e outro destinado a medir a temperatura do próprio resistor.

O conjunto ainda é constituído por duas caixas de isopor, a menor, contendo o resistor, fica dentro de uma maior, visando à qualidade da isolamento térmica. Tais características podem ser observadas na figura 13.

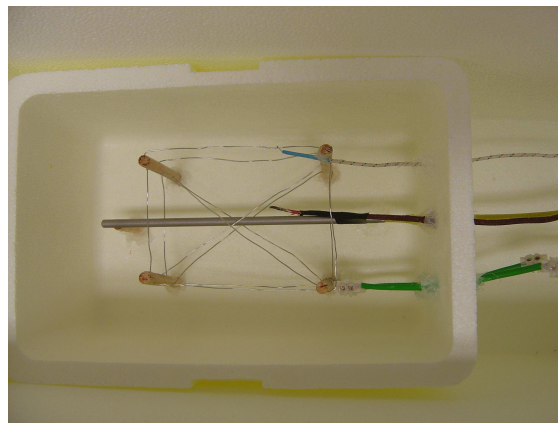


Figura 13 – Novo sistema de medição

Para uma visualização completa, a figura 14 mostra uma foto completa do novo sistema.

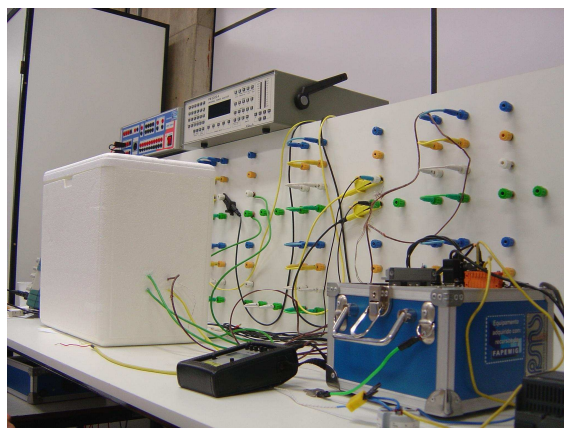


Figura 14 – Sistema completo

Com o sistema totalmente reformulado, um novo conjunto de medições foi realizado.

IX. RESULTADOS DAS NOVAS MEDIÇÕES

Frente a todos os esforços para a correção das inúmeras dificuldades encontradas na prática, as novas medições realizadas objetivaram principalmente a obtenção de resultados coerentes e confiáveis do aumento da resistência com a frequência para que, partindo desse princípio, pudessem ser analisados sinais não senoidais com convicção e segurança dos resultados encontrados.

Devido ao fato da máxima frequência da fonte corrente da caixa Omicron ser 1 kHz, para as medições apresentadas a seguir, foi utilizada uma fonte de tensão da Pacific Instruments, a qual apresenta frequência máxima de 5000 Hz para que não houvesse influência da temperatura. Ademais, para a retirada do efeito térmico no aumento da resistência, todo o experimento foi feito dentro de um período suficientemente pequeno.

Partindo destes princípios, são explicitadas abaixo, duas figuras contendo os resultados de duas medições. A curva vermelha corresponde aos valores de resistência medidos pelo PM3000 e a azul, aos resultados da divisão calculada

através de valores de tensão e corrente medidos pelo equipamento supracitado.

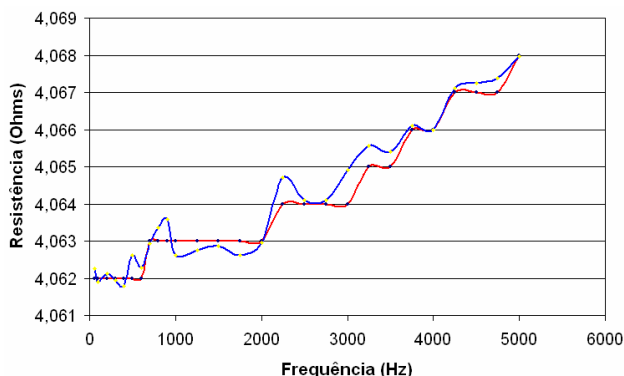


Figura 15 – Resistência versus frequência

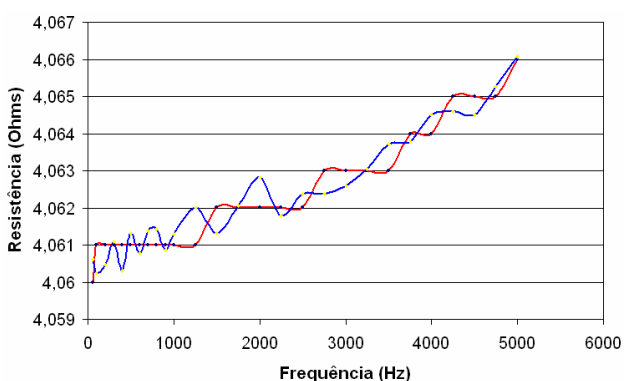


Figura 16 – Resistência versus frequência

Na primeira medição citada, observa-se que a resistência aumenta, de 0 a 5000 Hz, 0,1477 % para os valores medidos e 0,1408 % para os calculados. Na segunda, os referidos valores são, respectivamente, 0,1478 % e 0,1346 %.

X. ANÁLISES DOS RESULTADOS FINAIS

Neste trabalho foram realizados estudos teóricos e medições laboratoriais sobre o efeito pelicular, objetivando, primeiramente, resultados confiáveis para a análise do comportamento da resistência frente ao aumento da frequência, para que assim, pudessem ser analisados sinais não senoidais. Através de diferentes resistências e sistemas medições, buscou-se encontrar as melhores medições com os menores erros possíveis. Porém, as limitações dos equipamentos, tanto no que se refere ao limite de frequência do sinal gerado, como também quanto à precisão dos medidores, dificultou representativamente o alcance do objetivo.

Frente a tal conjuntura, ou seja, dentro das limitações dos equipamentos e do sistema de medição, foi possível determinar o comportamento da resistência em função da frequência até 5000 Hz. Porém, ao serem adicionadas diversas linhas de tendência para que fosse determinado o comportamento da resistência, o coeficiente de correlação foi maior que 0,9 para as regressões linear, exponencial e a polinomial de grau três.

Apesar disso, é citada abaixo uma figura contendo as curvas calculada, medida e a regressão polinomial de grau três desta última, a qual possui coeficiente de correlação igual a 0,9704, ou seja, o maior encontrado dentre todos os analisados.

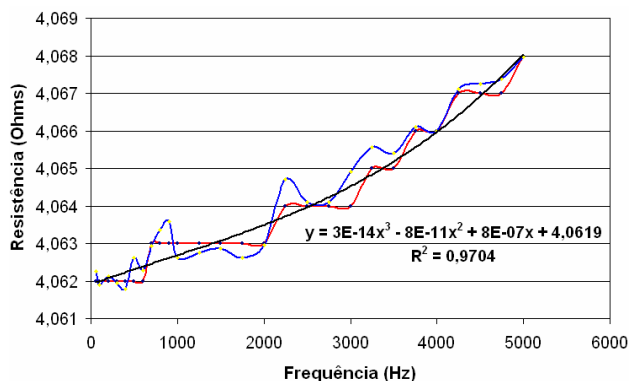


Figura 17 – Regressão da curva obtida através de medição

Através desta regressão, foi construída a tabela explicitada abaixo, contendo algumas amostras para uma melhor quantificação do aumento relativo da resistência devido ao efeito pelicular.

Tabela 01 – Resultados obtidos da regressão

Frequência [Hz]	Aumento relativo da resistência [%]
0	0
5000	0,14
10000	0,74
15000	2,34
20000	5,54

Como pode-se observar, para que haja um incremento de aproximadamente 5 % na resistência, é necessário que a frequência seja maior que 15 kHz.

Finalmente, é citada a comparação entre os resultados obtidos com uma corrente senoidal e uma quadrada, ambas com frequência fundamental de 60 Hz. Observou-se que a resistência para a corrente distorcida é apenas 0,002 % maior que a referente à corrente senoidal. Tais fatos são justificados pela comprovação prática de que neste caso sob análise, o efeito pelicular realmente é pouco representativo para frequências inferiores a 10 kHz.

XI. CONCLUSÕES

Primeiramente, dentro das limitações dos equipamentos, foram obtidas curvas satisfatórias do comportamento da resistência perante o aumento da frequência, a partir das quais, foi alcançada uma regressão com um coeficiente de correlação muito próximo de 1.

A partir destes resultados, conclui-se que para frequências até 5 kHz, a resistência não sofre alteração

significativa devido ao efeito pelicular. Tal comportamento é plausível perante a comparação com a primeira referência bibliográfica, haja vista que a resistência de um condutor cujo raio da seção transversal é 1 mm, permanece inalterada até 10 kHz, a partir da qual a resistência entra na região linear.

Além destas conclusões supracitadas, outro fato constatado foi a inexistência de um aumento significativo da resistência do condutor ao se comparar a passagem de uma corrente senoidal com a de uma não senoidal de mesma frequência fundamental. Porém, observa-se que o raio da seção transversal do condutor utilizado é pequeno (aproximadamente igual a 1 mm) e o efeito pelicular se torna mais representativo em seções maiores, como pode ser analisado na figura 01.

Portanto, de acordo com os resultados obtidos, conclui-se que, para a obtenção de medições do efeito pelicular em condutores percorridos por correntes não senoidais, deve-se primeiramente obter resultados melhores para o simples aumento da resistência com relação à frequência.

Assim, para que tal objetivo seja alcançado, faz-se como sugestão para trabalhos futuros a utilização de resistores com seções transversais maiores para que o efeito seja mais nítido e para que possam ser aplicadas correntes com valores eficazes bem maiores. Apesar do efeito pelicular não sofrer influência do aumento do valor eficaz da corrente, tal fato faz com que a magnitude de cada componente harmônico de corrente seja bem mais representativa do que as oscilações encontradas no processo de medição. Consequentemente, é viabilizada a análise do efeito pelicular referente às correntes distorcidas.

Ademais, também é sugerida como melhoria a ser implementada no processo de medição, a manutenção das mesmas condições iniciais (principalmente a temperatura ambiente e umidade relativa do ar) para a realização de diferentes experimentos, tanto para correntes senoidais, como para as não senoidais. Tal fato reduz erros referentes à distribuição de temperatura na caixa de isopor e no valor da resistência inicial devido ao efeito térmico.

Por fim, são sugeridas como trabalhos futuros, a aplicação de várias formas de ondas distorcidas para a quantificação do efeito pelicular nestas condições e a inferência das perdas elétricas a partir dos valores de temperatura obtidos nos experimentos laboratoriais.

XII. AGRADECIMENTOS

Nossos sinceros e enormes agradecimentos são para todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Porém, é extremamente plausível enfatizar as representativas e decisivas contribuições nas medições laboratoriais e nos resultados

encontrados de nosso co-orientador Marcel Parentoni e do aluno de graduação Ivan Paulo de Faria.

XIII. REFERÊNCIAS

- [1] O. M. O. Gatous, J. P. Filho, "A New Formulation for Skin-effect Resistance and Internal Inductance Frequency-Dependent of a Solid Cylindrical Conductor", IEEE/PES 2004 Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, pp. 919-924.
- [2] W. Mingli, F. Yu, "Numerical Calculations of Internal Impedance of Solid and Tubular Cylindrical under Large Parameters" IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol 151, no. 1, January 2004.
- [3] A. E. Knowlton, R. M. Shoop, Manual "Standard" del Ingeniero Electricista, Editorial Labor, S. A., 1967.
- [4] Pirelli, Nota de Cálculo de Resistências, Reatâncias Capacitivas e Indutivas para Cabos de Energia.
- [5] Skin and Proximity Effects in Nonmagnetic Conductors, Sérgio L. M. Berleze and René Robert.
- [6] A. H. M. Arnold, "The alternating-current resistance of hollow, square conductors", J. Inst. Elect. Eng., vol. 82, pp. 537-545, 1938.

BIOGRAFIA:



Ricardo Cunha Perez

Nasceu em Campinas (SP), em 1985. Por estar se graduando em engenharia elétrica com ênfase em sistemas elétricos, estagiou dois anos no Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica (GQEE) da UNIFEI, participando principalmente de dois P&Ds (o primeiro da CEMAT e o segundo da CEMIG). Atualmente é estagiário da CPFL Geração no Departamento de Planejamento da Geração, sendo responsável pelas simulações da TUST_{RB} através do programa nodal.



Gustavo Espagnoli Geraldo Martins

Nasceu em Ilha Solteira (SP), em 1983. Ingressou na UNIFEI em 2003, onde está cursando o último ano de engenharia elétrica com ênfase em sistemas elétricos. Atualmente é estagiário da COPEM Engenharia, sendo responsável por projetos de usinas hidrelétricas.