

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS FERREIRA GERMANO

**APLICATIVO PARA CÁLCULO DA CORRENTE MÁXIMA DE *DERATING* PARA
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA DE ATÉ 50MVA EM AMBIENTE COM
DISTRORÇÃO HARMÔNICA**

UBERLÂNDIA

2023

LUCAS FERREIRA GERMANO

APLICATIVO PARA CÁLCULO DA CORRENTE MÁXIMA DE *DERATING* PARA
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA DE ATÉ 50MVA EM AMBIENTE COM
DISTRORÇÃO HARMÔNICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Área de conhecimento: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Tavares

UBERLÂNDIA

2023

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, minha avó e minha irmã, que sempre estiveram presentes na minha rotina ao longo da minha graduação.

Ao meu namorado Kevin, e aos meus amigos, que me acompanharam e deram apoio ao longo da realização deste trabalho, e da minha graduação.

Aos meus chefes Antônio e Diego, que graças a eles, tive contato com a linguagem *Swift*, fundamental na realização deste trabalho.

Ao corpo docente da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU, por todo trabalho realizado durante minha graduação, em especial ao Prof. Carlos Eduardo Tavares pelo apoio e orientação na realização deste trabalho, e ao Prof. Adélio José de Moraes, um grande profissional, que foi um grande mentor para mim, e a quem eu dedico este trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar e aplicar de forma prática e sistêmica a norma ANSI/IEEE C57.110 de 1986, que trata da técnica de *derating*, utilizada com a finalidade de redução das perdas nos enrolamentos em ambientes com distorção harmônica e consequente do sobreaquecimento em transformadores de potência. Para tanto é proposta uma aplicação desenvolvida na linguagem *Swift*, que favorece a implementação e usabilidade desta técnica de forma acessível e rápida. O aplicativo também possui uma funcionalidade que permite ao usuário calcular a estimativa de vida útil do transformador a partir da temperatura máxima obtida nos enrolamentos, que aliada à funcionalidade principal, permite estimar o ganho de horas em termos de durabilidade do equipamento, caso venha a operar nas condições calculadas e propostas. A aplicação apresentou resultados condizentes com os exemplos dados nas referências podendo, portanto, ser usada como ferramenta de estudos e planejamentos no âmbito de preservação de transformadores de potência.

PALAVRAS-CHAVES: TRANSFORMADORES. DERATING. DISTORÇÕES HARMÔNICAS. VIDA ÚTIL. PERDAS ELÉTRICAS. SWIFT. IOS.

ABSTRACT

This work aims to study and apply, in a practical way, the 1986 norm ANSI/IEEE C57.110, concerning the Derating technique used to minimize the loss in conductors in harmonic distortion environments, and to prevent overheating in power transformers. To accomplish this goal, this work proposes an application developed in *Swift*, which provides an accessible and quick way to use the technique. The application also allows the user to estimate the life span of the transformer using different norms for a given maximum temperature measured on the conductors. Both functionalities combined can provide an analysis on the gain of the transformer's durability when using the derating current provided. The application managed to perform well and provide data consistent with the references used on this work, therefore, proving that it can be used as tool to study and plan transformers longevity.

KEYWORDS: TRANSFORMERS. DERATING. HARMONIC DISTORTION. LIFESPAN. ELECTRICAL LOSSES. SWIFT. IOS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Exemplo de uma onda distorcida segmenta em uma Série de Fourier de elementos senoidais.	11
Figura 2: Diagrama fasorial das potências de um sistema elétrico, sob a influência de distorção harmônica.....	15
Figura 3: Circuito equivalente de Steinmetz, simplificado com a remoção do ramo magnetizante.....	18
Figura 4: Montagem do método dos dois wattímetros	19
Figura 5: Diagrama da Arquitetura MVVM.....	27
Figura 6: Tela inicial do aplicativo.....	28
Figura 7: Tela para averiguar quais dados estão disponíveis	29
Figura 8: Tela para entrada dos dados necessários para o cálculo da corrente de derating	31
Figura 9: Tela para cálculo do Fator de Perdas Harmônicas.....	32
Figura 10: Tela para apresentação do resultado referente à Corrente de Derating	32
Figura 11: Tela para estimativa da expectativa de vida útil do transformador	33
Figura 12: Fluxograma da Aplicação	34
Figura 13: Preenchimento da primeira tela em conformidade com o exemplo em análise.....	36
Figura 14: Preenchimento da segunda tela em conformidade com o exemplo em análise	37
Figura 15: Preenchimento da terceira tela em conformidade com o exemplo em análise	38
Figura 16: Tela de resultado da corrente de derating da aplicação, calculado a partir dos dados do exemplo em análise	39
Figura 17: Gráfico de análise das expectativas de vida útil de transformadores (DELAIBA, 1997). O eixo x está em graus celsius	40
Figura 18: Tela de resultado das expectativas de vida útil calculadas para uma temperatura de 433 K segundo a norma NBR 5416.....	41
Figura 19: Tela de resultado das expectativas de vida útil calculadas para uma temperatura de 433 K segundo a norma ANSI C57.91	42

Figura 20: Tela de resultado das expectativas de vida útil calculadas para uma temperatura de 433 K segundo a norma PECO.....42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores das constantes da equação de Arrhenius-Darkin segundo diferentes normas	24
Tabela 2: Redução da vida útil em função do aumento de temperatura [3]	25
Tabela 3: Harmônicos no exemplo da norma ANSI/IEEE C57.110 – 1986	35
Tabela 4: Estimativa de vida útil para temperatura de 433 K segundo o gráfico 6.5	41

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
DII	Distorção Individual de Corrente
DIT	Distorção Individual de Tensão
DTI	Distorção Total de Corrente
DTT	Distorção Total de Tensão
IIEC	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
iOS	<i>iPhone Operation System</i>
MVVM	<i>Model – View – ViewModel</i>
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
1 DISTRORÇÃO HARMÔNICA	11
1.1. ORIGEM DA DISTRORÇÃO HARMÔNICA	11
1.2. ANÁLISE DE POTÊNCIA	13
1.3. EFEITOS DA DISTRORÇÃO HARMÔNICA	15
2. DERATING PARA TRANSFORMADORES	17
2.1. DEFINIÇÃO.....	17
2.2. PERDAS SOB CARGA NO TRANSFORMADOR.....	17
2.3. EFEITO DAS CORRENTES HARMÔNICAS NAS PERDAS	20
2.3.1. <i>Perdas Joule</i>	21
2.3.2. <i>Perdas Por Corrente Parasitas nos Enrolamentos</i>	21
2.3.3. <i>Perdas Suplementares</i>	22
2.4. CORRENTE DE <i>DERATING</i>	22
3. ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES	24
4. APLICAÇÃO IOS	26
4.1. LINGUAGEM <i>SWIFT</i>	26
4.2. ARQUITETURA <i>MODEL-VIEW-VIEWMODEL</i>	26
4.3. ALGORITMO.....	27
5. RESULTADOS	35
5.1 EXEMPLO 5.4.2 DA NORMA ANSI/IEEE C57.110-1986.....	35
5.2 EXEMPLO DO CAPÍTULO 3 DA REFERÊNCIA 3.....	39
CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	44

INTRODUÇÃO

Atualmente, os transformadores estão presentes em uma grande parte dos circuitos elétricos e são indispensáveis em sistemas de distribuição de energia. Eles possuem características diversas, podendo variar em diferentes aspectos, como parâmetros elétricos, tipo de refrigeração, dimensões etc. Considerando essas variações, que implicam em ressalvas financeiras e logísticas, o transformador não é um equipamento fácil de se substituir, portanto, preservar por sua vida útil e boa performance é de grande importância.

Com o objetivo de preservar equipamentos elétricos, a área de qualidade da energia é de grande auxílio, pois ela possibilita identificar as origens de fenômenos indesejáveis na rede, os quais podem ser danosos ao sistema. Ademais, é o campo de engenharia elétrica que estuda as diferentes técnicas de mitigação e prevenção desses fenômenos. No caso de transformadores, uma das origens de danos parte de fenômenos na rede que elevam sua corrente, de forma que se aumentam as perdas elétricas e a temperatura dos enrolamentos. Esse aumento provoca desgastes no equipamento, que eventualmente podem inutilizá-lo. A NBR 5416 estima que uma elevação de 6°C no ponto mais quente do enrolamento resulta numa redução de cerca de 50% da vida útil do equipamento.

A distorção harmônica é um dos eventos que podem causar sobreaquecimento em transformadores, visto que ela é capaz de elevar a corrente eficaz da rede. Esse fenômeno é bastante comum devido ao crescente número de tecnologias que utilizam cargas não-lineares, como sistemas de automação, iluminação e outros. Levando isso em consideração, este trabalho tem por objetivo desenvolver uma aplicação para *iPhone Operation System (iOS)*, que utilize a técnica de *derating*, em conformidade com a norma do *American National Standards Institute*, a ANSI/IEEE C57.110 de 1986. *Derating* significa usar um equipamento, geralmente elétrico ou mecânico, abaixo de sua capacidade máxima e, no contexto dessa norma e deste trabalho, é abordada essa prática aplicada a transformadores de distribuição de até 50 MVA. Mais especificamente, o documento da norma estabelece um procedimento para estimar a regulagem de corrente máxima de entrada em um transformador, de tal forma que a perda nos enrolamentos na presença de correntes harmônicas não seja superior à mesma perda na situação de frequência nominal.

A principal funcionalidade do aplicativo consiste em fornecer uma estimativa dessa regulagem de corrente a partir de informações de entrada simples do transformador, provenientes dos dados de placa e de ensaios em curto-circuito e a vazio. A linguagem de desenvolvimento escolhida foi a *Swift*, que gera códigos compiláveis por dispositivos da empresa Apple, cujo sistema operacional é o *iOS*. A arquitetura utilizada foi a MVVM (*Model View View-Model*), que categoriza os arquivos do projeto com base nas suas funções, nos âmbitos de lógica, dados e interface, com o objetivo de facilitar a organização, atualização, leitura e manutenção do código.

Espera-se que com esta aplicação, cientistas, alunos, técnicos e engenheiros possam realizar análises rápidas quanto ao desempenho e às condições de funcionamento de transformadores submetidos a distorções harmônica. Assim, com as informações calculadas pelo aplicativo, será possível estimar o valor de corrente proposta pela norma da ANSI que resulte em um modo de operação adequado para o transformador, evitando sobrecarga e sobreaquecimento e que, conseqüentemente, preserve sua vida útil.

1 DISTORÇÃO HARMÔNICA

1.1. Origem da distorção harmônica

A distorção harmônica é um fenômeno causado, principalmente, pela presença de cargas não-lineares no circuito, ou seja, aquelas cujos valores de corrente e tensão não seguem uma relação linear. Alguns exemplos dessas cargas são aquelas que utilizam eletrônica, e equipamentos magnéticos saturados.

As cargas não-lineares adulteram o perfil senoidal da corrente, o que pode resultar em diversos formatos de ondas. Para fins analíticos, essas ondas não-senoidais podem ser decompostas em um somatório de ondas senoidais, dadas como uma Série de Fourier. Os elementos dessa série possuem frequências distintas, podendo conter a denominada frequência fundamental (f_1), que equivale a 60 Hz nos padrões brasileiros, e frequências múltiplas inteiras da fundamental, denominadas harmônicos, que também consistem em ondas senoidais, porém de frequência f_h , dada pela equação (1.1). O índice h representa um número inteiro, que além de denotar a relação entre a frequência do harmônico e a fundamental, também é usado para indicar sua ordem (harmônicos de 3ª ordem, de 5ª ordem etc.).

$$f_h = f_1 * h \quad (1.1)$$

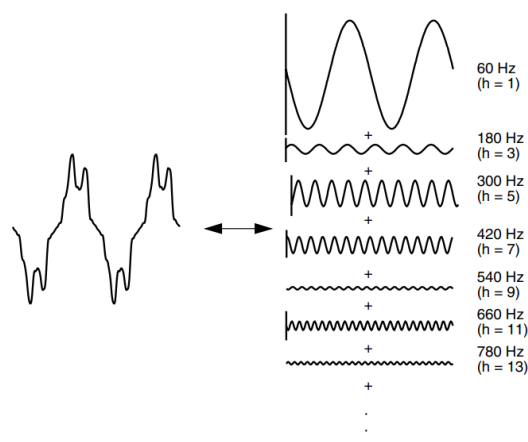


Figura 1: Exemplo de uma onda distorcida segmenta em uma Série de Fourier de elementos senoidais.
Fonte: Electrical Power Systems Quality

Na presença deste fenômeno, o cálculo de características elétricas como tensão e corrente eficazes (V_{rms} e I_{rms} , respectivamente), deve considerar os harmônicos, e não apenas os parâmetros na frequência fundamental. Isso é feito por meio de uma soma quadrática, utilizando os valores de picos das senoides de cada harmônico, como pode ser observado nas equações (1.2) e (1.3).

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_h\right)^2} \quad (1.2)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_h\right)^2} \quad (1.3)$$

Onde:

- V_h : Tensão de pico no harmônico de ordem h
- I_h : Corrente de pico no harmônico de ordem h

A ordem máxima (h_{max}) refere-se à ordem da harmônica a partir da qual os valores da série de Fourier do sinal em análise podem ser desprezados. De acordo com a segunda edição do livro *Electrical Power Systems Quality*, em sistemas de energia, estima-se que essa ordem máxima esteja entre a 25ª e a 50ª, no entanto, apesar de valores acima dela serem comumente desprezados, eles requerem atenção em casos de ressonância.

É possível definir uma quantificação do fenômeno de distorção harmônica por meio da relação entre os parâmetros elétricos nas circunstâncias de frequência fundamental, e nas outras frequências.

$$DIT\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (1.4)$$

Onde:

- DIT%: Distorção individual de tensão percentual;
- V_h : Tensão harmônica;
- V_1 : Tensão na frequência fundamental.

$$DII\% = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (1.5)$$

Onde:

- DII%: Distorção individual de corrente percentual;
- I_h : Corrente harmônica;
- I_1 : Corrente na frequência fundamental.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (1.6)$$

Onde:

- DTT%: Distorção total de tensão percentual.

$$DTI\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (1.7)$$

Onde:

- DTT: Distorção total de corrente percentual.

Com esses valores, é possível simplificar as fórmulas do cálculo da tensão e da corrente eficazes do circuito, como descrevem as equações 1.8 e 1.9.

$$V_{rms} = V\sqrt{1 + DTT^2} [V] \quad (1.8)$$

$$I_{rms} = I_1\sqrt{1 + DTT^2} [A] \quad (1.9)$$

1.2. Análise de Potência

Em circuitos elétricos, cujo sinal é puramente senoidal, a potência ativa (P_1), que produz trabalho real, é dada pela equação 1.10, e a potência reativa (Q_1) na frequência fundamental

pela equação 1.11. Nas equações abaixo, Φ_1 refere-se ao desfasamento angular entre tensão e a corrente fundamental.

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \Phi_1 \quad (1.10)$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \Phi_1 \quad (1.11)$$

Conseqüentemente, considerando-se a distribuição das naturezas de potência, a potência total na frequência fundamental (S_1) pode ser dada pela equação (1.12).

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (1.12)$$

Entretanto, ao considerar as distorções harmônicas, a potência total verdadeira (S) do sistema não é dividida apenas em potência ativa (P) e potência reativa (Q), pois além da potência não ativa normalmente associada às capacitâncias e indutâncias de um sistema em frequência fundamental, existe uma componente relacionada às distorções harmônicas. Embora existam discussões para classificar as perdas oriundas dos harmônicos, um método possível, e adotado em Duncan et al. (2002), é a identificação da componente D , dada pela equação 1.13:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (1.13)$$

Portanto, a partir da componente D , que auxilia a categorização das potências de um sistema elétrico, e da representação vetorial (figura 2), é possível realizar as seguintes análises:

- o par P_1 e Q_1 estão em quadratura, e resultam em S_1 , cujo fator de potência associado é dado pela equação (1.14), e é denominado de fator de potência de deslocamento (FP_1);

$$FP_1 = \frac{P}{S_1} \quad (1.14)$$

- o fator de potência verdadeiro (*true power factor*), denotado por FP, deve considerar a distorção harmônica, logo deve partir da relação entre a potência ativa e a potência total (S), segundo a equação (1.15).

$$FP = \frac{P}{S}$$

(1.15)

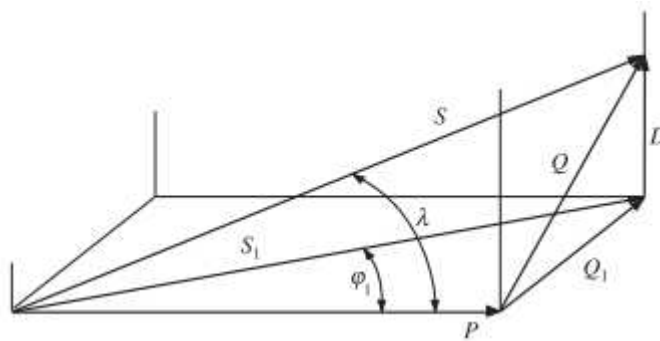


Figura 2: Diagrama fasorial das potências de um sistema elétrico, sob a influência de distorção harmônica
 Fonte: Voltage Quality in Electrical Power Systems

1.3. Efeitos da distorção harmônica

Os principais efeitos da distorção harmônica que afetam diretamente sistemas elétricos são relacionados com a aparição de valores de tensão e corrente inusitados no circuito. Os diferentes tipos de componentes presentes em um circuito elétrico são afetados de diferentes formas por essas circunstâncias, como mostra o livro *Voltage Quality in Electrical Power Systems* (1999):

- Condutores:** Com a possibilidade de altos valores de correntes causados pela distorção harmônica, os condutores dissipam mais calor em forma de perda térmica, e ficam sujeitos à variação de resistência devido ao efeito pelicular.
- Máquinas elétricas:** As correntes provenientes de harmônicos, fora da frequência fundamental do sistema, não contribuem com o torque das máquinas elétricas. Em vez disso, o que pode vir a ocorrer é diminuir a eficiência ao aumentar as perdas térmicas, e provocar vibrações e ruídos de alta frequência, possivelmente audíveis. Operar nessas

condições distantes das ideais, também pode fazer com que a máquina tenha sua vida útil reduzida, e em alguns casos extremos, pode levar a dano imediato do equipamento.

- **Capacitores:** Devido à impedância variável com a frequência dos capacitores, é possível que eles sofram ressonância em alguma ordem harmônica, que resulte em prejuízos para o sistema. Ademais, a instabilidade da tensão provocada pela distorção harmônica é capaz de queimá-los ao causar estresse no isolamento.
- **Transformadores:** Nos transformadores, aumentam-se também as perdas térmicas nos condutores, devido ao efeito Joule. Como no caso das máquinas elétricas, os transformadores também comprometem sua vida útil ao operarem nessas situações.
- **Circuitos de proteção:** As distorções harmônicas podem prejudicar sistemas de proteção, pois grande parte de seus componentes baseiam-se no valor de pico de corrente e tensão para inferir o valor eficaz do que seria uma onda senoidal. Entretanto, com sinais distorcidos, a relação desses dois valores passa a ser imprevisível, e é possível que esses equipamentos sejam acionados sem necessidade.
- **Sistemas eletrônicos e de telecomunicações:** Os harmônicos podem provocar mal funcionamento em equipamentos que trabalham com a detecção de passagem por zero dos sinais de tensão e corrente, e equipamentos computacionais podem perder dados. No caso das telecomunicações, também é possível que os harmônicos poluam os canais de comunicação.

Existem diversas formas de mitigações desses efeitos, e cada situação requer um método diferente, mais adequado ao sistema e aos equipamentos envolvidos. Algumas delas são:

- Utilizar filtros de harmônicos nas faixas de frequências mais danosas à rede;
- Alterar o tipo de conexão dos transformadores para delta-estrela, para diminuir a propagação de harmônicos de sequência zero;
- Utilizar bancos de capacitores dessintonizados, ou realocar o banco nos circuitos.

Este trabalho tem como foco o método *derating* para transformadores, que apesar de não evitar a circulação de correntes harmônicas na rede, visa a preservação do equipamento.

2. DERATING PARA TRANSFORMADORES

2.1. Definição

De forma geral, *derating* é um termo que se refere a utilizar um equipamento abaixo da sua capacidade máxima. Mais especificamente na área de elétrica, em situações de sobrecarga causadas por distorção harmônica, a prática de *derating* é uma alternativa para reduzir o impacto deste fenômeno em máquinas elétricas e transformadores, a fim de preservar suas vidas úteis. Essa prática consiste em reduzir a potência de operação, para que ela não exceda a potência nominal do equipamento. No caso de transformadores, recomenda-se aplicá-la a partir de uma distorção harmônica de 5% no sistema.

Segundo a norma ANSI/IEEE C57.110, para se parametrizar a potência de operação que deve entrar no transformador, deve-se definir uma corrente máxima de entrada, que provoque uma perda nos enrolamentos do transformador próxima de sua perda nominal, apesar do acréscimo causado pela distorção harmônica.

2.2. Perdas Sob Carga no Transformador

No cálculo de *derating*, considera-se as perdas sob carga nos enrolamentos, pois são as que envolvem diretamente os enrolamentos, cujo sobreaquecimento prejudica os condutores. Essas perdas podem ser divididas entre as perdas joulicas (P_{J-N}), as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC-N}), e as perdas suplementares nas demais partes do transformador (P_{OSL-N}). A perda total da carga na frequência nominal da rede (P_{C-N}) é dada pela equação 3.1.

$$P_{C-N} = P_{J-N} + P_{EC-N} + P_{OSL-N}$$

(2.1)

- **Perdas por efeito Joule nos enrolamentos (P_{J-N}):**

Elas ocorrem devido à passagem de corrente nos enrolamentos do transformador. É possível determiná-la com os dados provenientes do ensaio de curto-circuito utilizando a equação 2.2, que determina essa perda por fase de transformadores de dois enrolamentos.

$$P_{J-N} = R_N(p)I_N^2(p) + R_N(s)I_N^2(s) \quad (2.2)$$

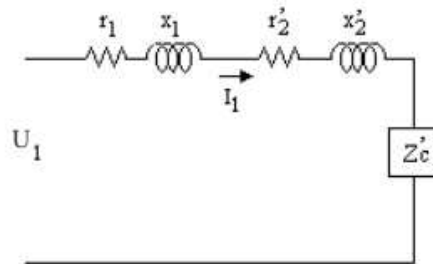


Figura 3: Circuito equivalente de Steinmetz, simplificado com a remoção do ramo magnetizante. Representação válida apenas para cargas próximas da nominal.
Fonte: Apostila Transformadores de Potência

- **P_{J-N}**: Perdas joulicas para frequência nominal
- **R_N(p) e r₁**: Resistência do enrolamento primário
- **R_N(s)**: Resistência do enrolamento secundário
- **r'2**: Resistência do enrolamento secundário referida ao primário
- **X₁**: Indutância do enrolamento primário
- **X'2**: Indutância do enrolamento secundário referida ao primário
- **I_N(p) e I_N(s)**: Respectivamente, correntes no primário e no secundário para frequência nominal.
- **I₁**: Corrente no primário, que equivale à nominal, para a carga nominal
- **Z'c**: Impedância da carga referida ao primário
- **U₁**: Tensão de entrada

Caso o transformador esteja operando com os dados nominais, é possível calcular essas perdas com os dados de placa relativos às tensões no primário e no secundário (V_1 e V_2), e a potência do transformador, determinando os seguintes parâmetros com as equações de 2.3 a 2.6, e as aplicando na equação 2.2 com a corrente nominal.

$$Z_{b1} = \frac{V_1^2}{S_n} \quad (2.3)$$

$$Z_{b2} = \frac{V_2^2}{S_n} \quad (2.4)$$

$$R_N(p) = \frac{R\% Z_{b1}}{100 \cdot 2} \quad (2.5)$$

$$R_N(s) = \frac{R\% Z_{b2}}{100 \cdot 2} \quad (2.6)$$

- Z_{b1} : Impedância base do primário
- Z_{b2} : Impedância base do secundário

Observação: Para os fins deste trabalho, apesar da resistência porcentual (R%) não ser comumente informada pelo fabricante, ela será adotada como 1% na aplicação apresentada no capítulo 5.

Por fim, outra maneira de se determinar essas perdas em um transformador trifásico, é pelo método dos dois wattímetros, cuja montagem é indicada na figura 4. A soma dos valores acusados por W1 e W2 refere-se ao total das perdas em r_1 e r_2 das três fases.

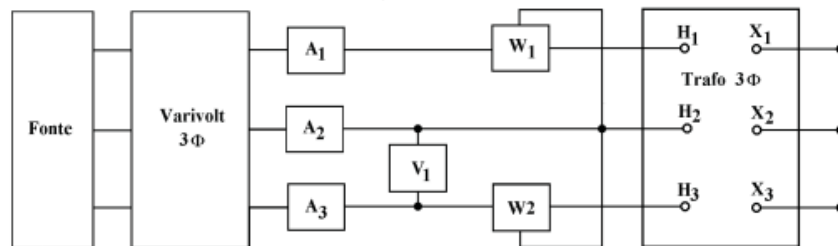


Figura 4: Montagem do método dos dois wattímetros
Fonte: Apostila Transformadores de Potência

Nota-se ainda, que as perdas joulicas podem ser agravadas pelo Efeito *Skin* (ou pelicular), e pelo Efeito de Proximidade, dois fenômenos que distorcem a distribuição dos elétrons da corrente nos condutores. O primeiro ocorre, pois, a distribuição de corrente não é uniforme nos enrolamentos, e o segundo devido à interação dos campos magnéticos dos condutores próximos.

- **Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos na frequência nominal (P_{EC-N}):**

Elas ocorrem pela circulação da corrente parasita nos condutores do transformador. Segundo a ANSI/IEEE C57.110, elas podem ser calculadas conforme a equação 2.7.

$$P_{EC-N} = K_1 A J_n^2 \quad (2.7)$$

Onde:

- **K_1** : Constante que depende da frequência de alimentação, de características material do condutor, e da permeabilidade magnética do vácuo;
- **A [m^2]**: Área de secção transversal do condutor;
- **J_n [A/m^2]**: densidade de corrente nominal eficaz.

Devido à dificuldade de obtenção desses dados, e o baixo valor que essa perda representa na frequência fundamental, na prática é comum estimá-lo apenas como cerca de 3% das perdas joulicas.

- **Perdas suplementares nas demais partes e em frequência nominal (P_{OSL-N}):**

São as que ocorrem devido à dispersão do fluxo magnético do transformador nas demais partes metálicas. Visto que são muito menores que os outros tipos de perdas, ela pode ser desprezada, especialmente em transformadores a seco.

2.3. Efeito das correntes harmônicas nas perdas

Na presença de distorção harmônica, a corrente eficaz do circuito se eleva, o que consequentemente afeta as perdas nos enrolamentos. Esse fenômeno afeta cada componente da perda sob carga do transformador da seguinte forma:

2.3.1. Perdas Joule

Visto que essa perda é dada pelo produto da resistência do transformador com o quadrado da corrente (RI^2), na presença de distorção harmônica, essa perda se eleva proporcionalmente ao quadrado do aumento da corrente eficaz total do circuito. A nova **perda joule para um sinal não senoidal (P_J)** é dada pela equação 2.8.

$$P_J = R[\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h)^2]^{1/2} [W] \quad (2.8)$$

Onde:

- P_J : Perdas joulicas;
- R : Resistência dos enrolamentos;
- I_h : Corrente harmônica de ordem h .

2.3.2. Perdas Por Corrente Parasitas nos Enrolamentos

Esse tipo de perda é afetado não apenas pela variação no valor eficaz de corrente, mas também por fatores magnéticos relacionados às frequências. A C57.110 propõe a equação 2.9 para se obter as novas **perdas por correntes parasitas para um sinal não senoidal (P_{EC})**.

$$P_{EC} = P_{EC-N} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_N} \right]^2 h^2 [W] \quad (2.9)$$

- P_{EC-N} : Perdas por correntes parasitas na frequência nominal;
- I_h : Corrente na frequência harmônica de ordem h ;
- I_N : Corrente na frequência nominal.

2.3.3. Perdas Suplementares

As perdas suplementares também se elevam com o aumento da corrente eficaz, entretanto elas se distribuem no núcleo e na estrutura do transformador. Embora essas partes se aqueçam em decorrência disso, esse não é um problema crítico, como é para os enrolamentos.

2.4. Corrente de *Derating*

Para se calcular a corrente de *derating*, é possível desprezar as suplementares, visto que é uma técnica aplicada para preservar os enrolamentos. Além disso, a norma da ANSI propõe que os cálculos sejam feitos em pu, utilizando o produto RI^2 , relativo às perdas joulicas, como base para as perdas, e a corrente medida na frequência fundamental como base para as correntes. Considerando isso, a equação 2.1 pode ser reescrita para situação de tensão não senoidal como na equação 2.10.

$$P_C[pu] = P_J[pu] + P_{EC}[pu] \quad (2.10)$$

Aplicando se as bases nas equações 2.8 e 2.9, tem-se a equação 2.11.

$$P_C(pu) = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_h(pu)^2]^{\frac{1}{2}} + P_{EC-N}(pu) \sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_h(pu)]^2 h^2 \quad [pu] \quad (2.11)$$

A soma quadrática de correntes dada pela primeira parcela da equação 2.11 representa a corrente que circula pelo transformador, e pode ser isolada como na equação 2.12, onde f_h é dado pela equação 2.13.

$$I(pu) = \sqrt{\frac{P_C(pu)}{1 + \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} f_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} f_h^2} P_{EC-N}(pu)}} \quad (2.12)$$

$$f_h = \frac{I_h}{I_N} \quad (2.13)$$

Se a perda em carga (P_C) na equação 2.12 for adotada como equivalente à perda que ocorre na frequência nominal, ou seja, substituir P_C por P_{C-N} , tem-se então a corrente máxima do transformador, que não provoca perdas que causem sobreaquecimento.

$$I_{m\acute{a}x}(pu) = \sqrt{\frac{P_{J-N} + P_{EC-N}}{1 + \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} f_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} f_h^2} P_{EC-N}(pu)}} \quad (2.14)$$

Ainda, para fins de simplificação, o multiplicador do termo P_{EC-N} no denominador da equação 2.14 é denominado Fator de Perdas Harmônicas (F_{HL}), e dado pela equação 2.15.

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} (f_h^2 h^2)}{\sum_{h=1}^{\infty} f_h^2} \quad (2.15)$$

$$I_{max}[pu] = \sqrt{\frac{P_{C-N}(pu)}{1 + F_{HL} P_{EC-N}(pu)}} \quad (2.16)$$

3. ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES

Aplicando-se a técnica de *derating*, os transformadores que operam sob o efeito da distorção harmônica podem retardar bastante seu processo de desgaste, por passar a operar em temperaturas menores. Segundo a tese de doutorado “Comportamento de Transformadores com Cargas não Lineares: Uma Abordagem Analítica, Experimental e Numérica pelo Método dos Elementos Finitos” (DELAIBA, 1997), a estimativa do tempo de vida útil dos transformadores pode ser estabelecida pela equação 3.1, da teoria de “Arrhenius-Darkin”. Na equação, θ representa a temperatura em Kelvin do ponto mais quente dos enrolamentos durante a operação. A tabela 4.1 apresenta o que as demais constantes representam e os seus valores conforme diferentes normas.

$$EV_u = D \cdot d^{\left(\frac{A}{\theta} + C\right)} \text{ [horas]} \quad (3.1)$$

Tabela 1: Valores das constantes da equação de Arrhenius-Darkin segundo diferentes normas

	NBR 5416	ANSI C57.91	PECO
A → Constante do Material Isolante	6972,15	6328,8	15.457,225
C → Constante do Material Isolante	-14,133	-11,968	-34,129
D → Constante do Material Isolante	1	1	100
d → Constante	10	10	e

Com base nessa equação, com os parâmetros estabelecidos pela NBR 5416, é possível estimar uma relação entre a perda de vida útil com o aumento adicional de temperatura do transformador. A tabela 3.2 fornece essa estimativa, considerando uma expectativa de vida útil normal de 65.000 horas, e o ponto mais quente do enrolamento a 95 °C.

Tabela 2: Redução da vida útil em função do aumento de temperatura [3]

$\Delta\theta$ [°C]	Vu [horas]	Redução da vida útil [%]
0	65.000	0
1	57.772	11
2	51.363	21
3	45.693	30
4	40.676	37,42
5	36,232	44,25
6	32,294	50
7	28,800	55,7

Fonte: DELAIBA, 1997

Da tabela, é possível observar que o transformador pode perder aproximadamente 50% de sua vida útil, para uma elevação de temperatura de 6 °C. Quando este aumento está ligado às distorções harmônicas, esse prejuízo pode ser evitado aplicando-se técnicas como a de *derating*, abordada no capítulo 2.

4. APLICAÇÃO iOS

4.1. Linguagem *Swift*

A aplicação foi desenvolvida na linguagem *Swift* e ela é compilável apenas por dispositivos da empresa Apple, nas quais o sistema operacional é o iOS. Apesar dessa restrição, é uma linguagem que traz vantagens significativas para os desenvolvedores e para aplicação, como:

- Possui uma sintaxe simples e direta, portanto é capaz de criar funcionalidades complexas com menos linhas de código que outras linguagens.
- Ela apresenta diversas ferramentas que melhoram a experiência do usuário, e possui uma performance acima da média. Segundo a Apple, é uma linguagem que pode ser até 8,4 vezes mais rápida que a *Python*.
- Devido a sua velocidade, pode lidar com equações matemáticas mais complexas, sem depender de serviços online, e o aplicativo gerado pode rodar em dispositivos pequenos. Um *iPhone 8*, por exemplo, tem apenas 67,3 mm de largura, 138,4 mm de altura, e pesa apenas 148 gramas, o que facilita a portabilidade do programa para áreas de difícil acesso, ou com sinal fraco de internet.

4.2. Arquitetura *Model-View-ViewModel*

Para desenvolver o projeto da aplicação, foi utilizada a arquitetura *Model-View-ViewModel* (MVVM) como método de organização do código, visando melhorar seu desenvolvimento, clareza e facilidade de manutenção. O principal objetivo dessa arquitetura é diminuir as responsabilidades da camada de *View*, responsável pela disposição dos elementos de tela na interface.

A proposta da arquitetura é categorizar os arquivos do código da seguinte forma:

- **Model:** Refere-se a camada de dados, onde são contidas as classes dos objetos específicos do projeto, e seus métodos necessários para atender as demandas do aplicativo.
- **View:** É responsável pela apresentação dos elementos de interface
- **ViewModel:** Realiza a comunicação entre a camada de Model e de View, gerenciando os dados, elementos da interface que necessitam de lógica de funcionamento, as interações do usuário com a tela, dentre outras atribuições.

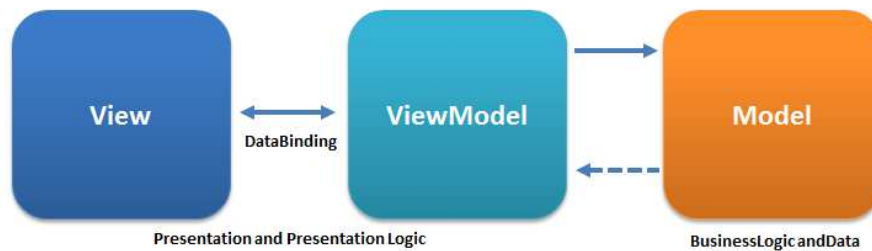


Figura 5: Diagrama da Arquitetura MVVM

4.3. Algoritmo

O aplicativo tem o objetivo de ser prático, e de ser capaz de prover uma estimativa de como se aplicar o *derating* no transformador. Portanto, seu algoritmo permite trabalhar com uma diversidade de combinações de dados, visando se adaptar aos que o usuário possa ter disponível, e que seja suficiente para o cálculo da corrente máxima dada pela equação 3.16. Ademais, o aplicativo também propicia a funcionalidade de calcular as estimativas de vida útil do transformador segundo às normas NBR 5416, ANSI C57.91, e PECO. A primeira tela do aplicativo é dada pela figura 6, e apresenta as duas funcionalidades do programa.

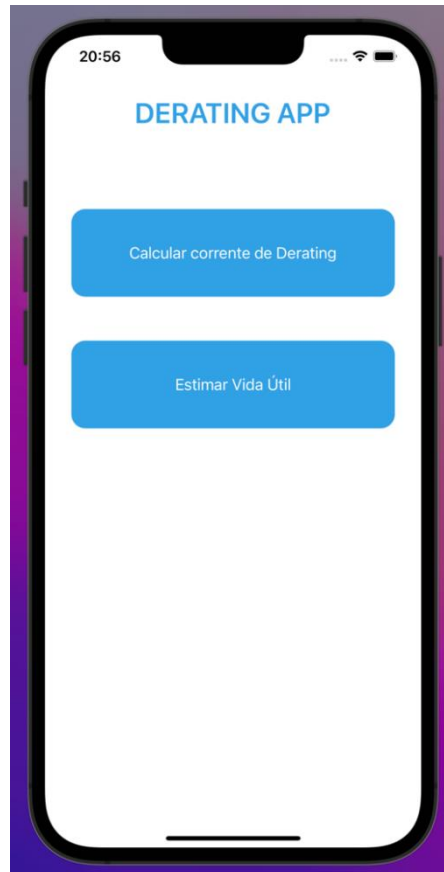


Figura 6: Tela inicial do aplicativo

Os dados mínimos para aplicar-se a técnica de *derating* são o **Fator de Perdas Harmônicas**, as **Perdas por Efeito Joule [pu]** e as **Perdas por Correntes Parasitas nos Enrolamentos [pu]**. Caso o usuário não tenha esses dados diretamente, o aplicativo ainda pode estimar ou calcular esses valores com outras opções de dados de entradas, que podem ser obtidos via dados de placa ou do fabricante, e pelo ensaio de curto-circuito. A maneira pela qual o usuário informa quais dados têm disponível, é pela tela que aparece, ao se clicar no botão “Calcular corrente de *Derating*” (figura 7).

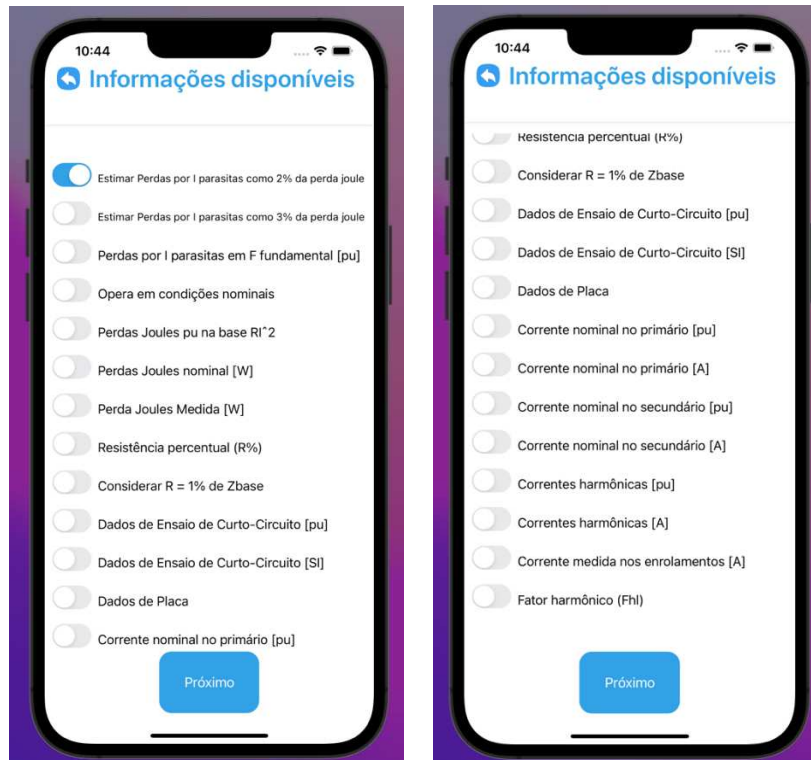


Figura 7: Tela para averiguar quais dados estão disponíveis

As duas telas seguintes dependem do preenchimento da tela da figura acima, e caso os dados não sejam suficientes para o cálculo da corrente de *derating*, é emitido um alerta avisando que não é possível realizar o cálculo com apenas os dados marcados como disponíveis, e o aplicativo não troca de tela. Para que o usuário possa seguir o fluxo, a determinação das grandezas envolvidas na equação 2.16 deve ser possível dentre as alternativas que o aplicativo fornece.

Passo 1 - Possibilidades para o cálculo das perdas Joule em pu na frequência nominal:

1. Adotar como 1, caso o usuário indique que o transformador opera em condição nominal;
2. Adotar como o valor em pu informado pelo usuário;
3. Adotar como a divisão entre o valor em watts informado pelo usuário, e a perda joule nominal também em watts. Caso esta última não seja informada, ela pode ser determinada com a equação 2.2, cujos dados necessários podem ser introduzidos no aplicativo por pelo menos uma das seguintes formas:
 - 3.1. O usuário pode informá-los diretamente, se tiver as informações obtidas pelo ensaio de curto-circuito;

- 3.2. As resistências podem ser calculadas com os dados de placa do transformador com as equações de 2.3 a 2.6, e se R% não estiver disponível, o aplicativo sugere ainda que ele seja estimado como 1%. Já as correntes nominais do primário e do secundário podem ser determinadas por inserção direta do dado, ou também calculadas a partir dos dados de placa.

Passo 2 - Possibilidades para o cálculo das perdas por correntes parasitas na frequência nominal:

1. Adotar como 2% da perda joulica na frequência nominal;
2. Adotar como 3% da perda joulica na frequência nominal;
3. Inserção direta do dado.

Passo 3 - Possibilidade para o cálculo Fator de perdas harmônica:

1. Inserção direta do dado;
2. Se o transformador operar em condições nominais, calcular com a equação 2.15, como em pelo menos um dos seguintes casos:
 - 2.1. A partir das correntes harmônicas em pu, e adotando a corrente fundamental como 1 pu;
 - 2.2. A partir dos das correntes harmônicas em Ampère, e as convertendo para pu com a corrente nominal, que pode ser ou informada diretamente, ou calculada via os dados de placa;
3. Se o transformador não operar em condições nominais, calcular com a equação 2.15, como em pelo menos um dos seguintes casos:
 - 3.1. A partir das correntes harmônicas em pu, e informando a corrente fundamental em pu;
 - 3.2. A partir das correntes harmônicas em pu, e informando a corrente fundamental em Ampère, e uma maneira de se obter a corrente nominal: ou informada diretamente, ou calculada via os dados de placa;
 - 3.3. A partir das correntes harmônicas, e a fundamental em Ampère, sendo possível convertê-las para pu com a corrente nominal, que pode ser ou informada diretamente, ou calculada via os dados de placa.

Satisfeita pelo menos uma das condições pra cada uma das variáveis da equação 2.16, a tela seguinte é populada dinamicamente com o mínimo de campos necessários para se calcular a corrente de *derating*.

22:21

Preencha as seguintes informações

Perdas Joule [W]

I Primário [A]

I Secundário [A]

Tensão Primário [V]

Tensão Secundário [V]

Potência Total [MVA]

Corrente Nominal [A]

Z% [%]

Corrente fundamental nos enrolamentos [A]

Próximo

Figura 8: Tela para entrada dos dados necessários para o cálculo da corrente de *derating*

Caso F_{HL} (Fator de Perdas Harmônicas) não seja informado diretamente, tem-se ainda uma tela dinâmica (figura 9) que permite a entrada dos dados referentes às correntes harmônicas, em pu ou Ampère, conforme for necessário. A tela é feita principalmente com um componente nativo da linguagem *Swift*, o *UITableView*, o qual é uma tabela com quantidade de células dinâmicas, nas quais podem ser informados os harmônicos e suas respectivas ordens, para que seja possível calcular o F_{HL} . Em seguida, tem-se a tela final do fluxo de *derating* (figura 10), apresentando o resultado calculado.

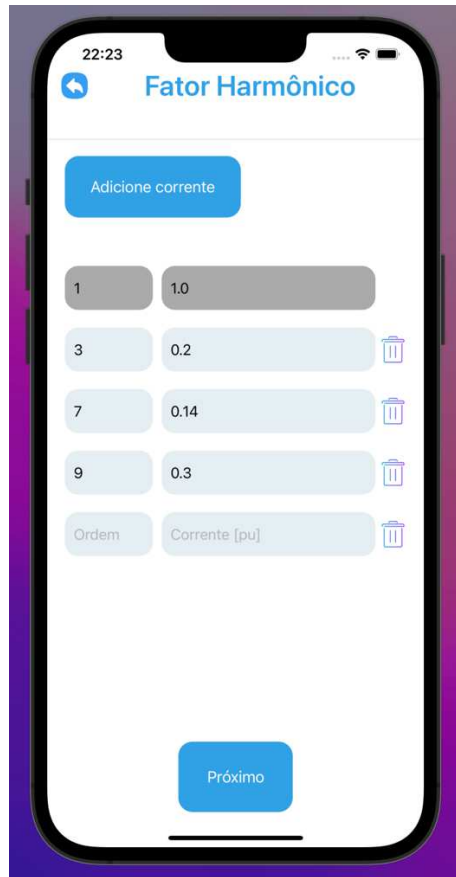


Figura 9: Tela para cálculo do Fator de Perdas Harmônicas

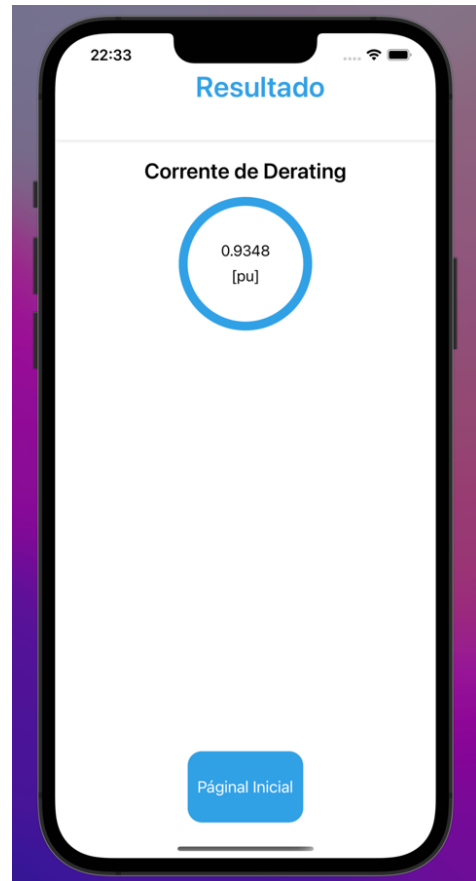


Figura 10: Tela para apresentação do resultado referente à Corrente de *Derating*

A partir da tela inicial, também é possível seguir para tela de cálculo da estimativa da vida útil (EV_U) do transformador em horas (figura 11). Este cálculo requer apenas um dado de entrada, a temperatura máxima dos enrolamentos do transformador [$^{\circ}C$], mas permite estimá-lo em conformidade com três normas diferentes.

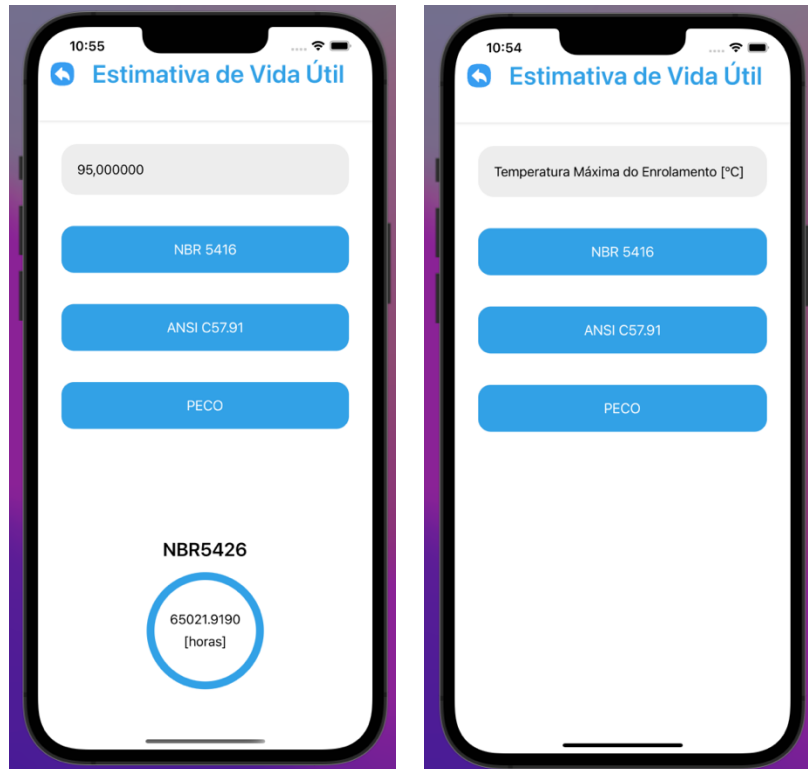


Figura 11: Tela para estimativa da expectativa de vida útil do transformador

Por fim, tem-se então o fluxograma da aplicação dado pela figura 11.

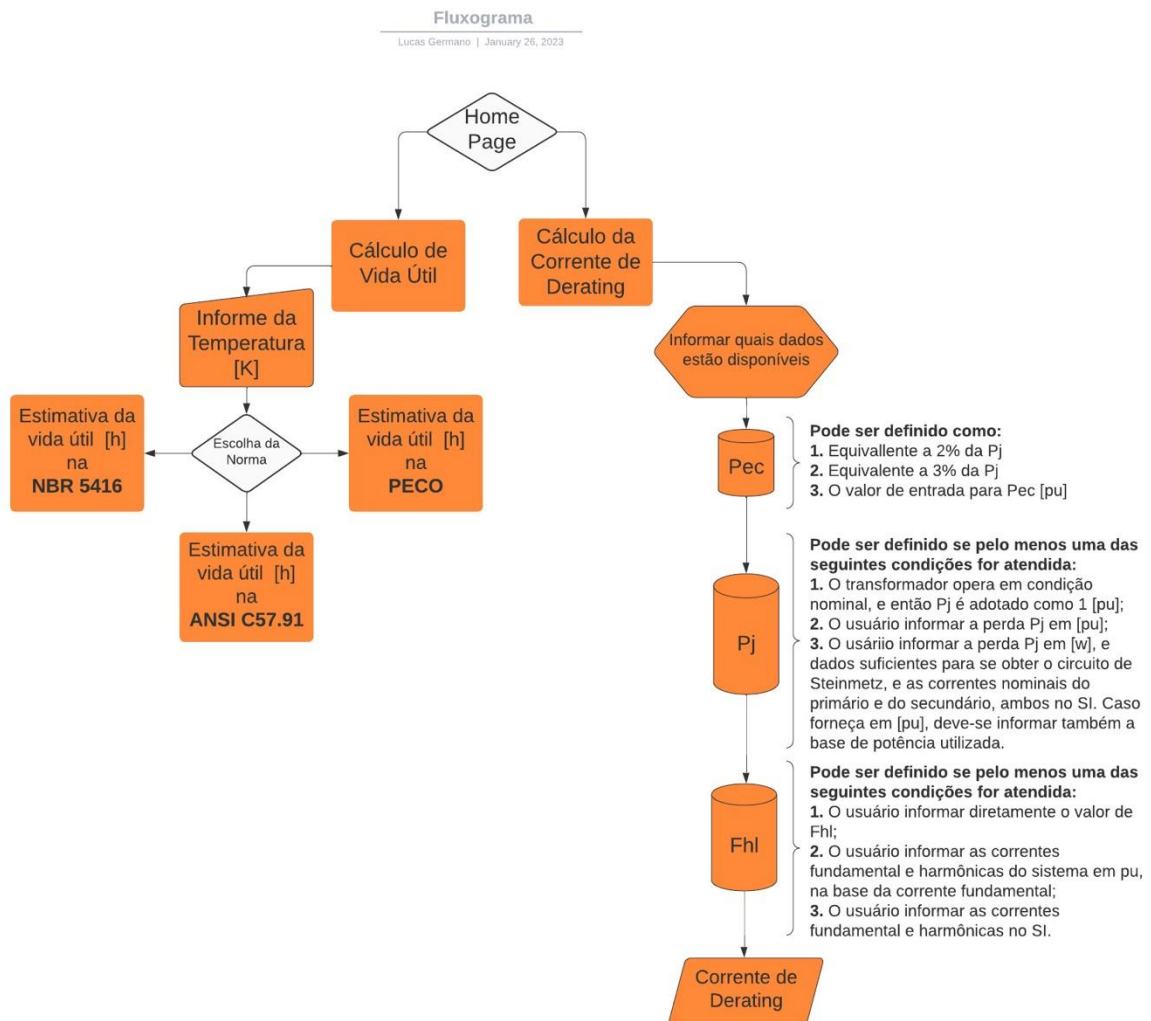


Figura 12: Fluxograma da Aplicação
Fonte: Acervo próprio, confeccionado no LucidChart

5. RESULTADOS

Para averiguar a qualidade dos resultados apresentados, utilizou-se um exemplo propiciado pela norma descrita na norma ANSI/IEEE C57.110-1986, para testar o fluxo de *derating*, e um exemplo em Delaiba (1997) para testar o fluxo de estimativa de vida útil do transformador.

5.1 Exemplo 5.4.2 da norma ANSI/IEEE C57.110-1986

A norma fornece os dados referentes às harmônicas pela tabela 3, e define que o transformador opera em condição nominal, e que as perdas por correntes parasitas se equivalem a 0,101 pu (base RI^2). O resultado para esses dados é uma corrente máxima de *derating* de 0,9293 [pu].

Tabela 3: Harmônicos no exemplo da norma ANSI/IEEE C57.110 – 1986

h	I_h (pu)
1	1.0
5	0.175
7	0.110
11	0.045
13	0.029
17	0.015
19	0.010

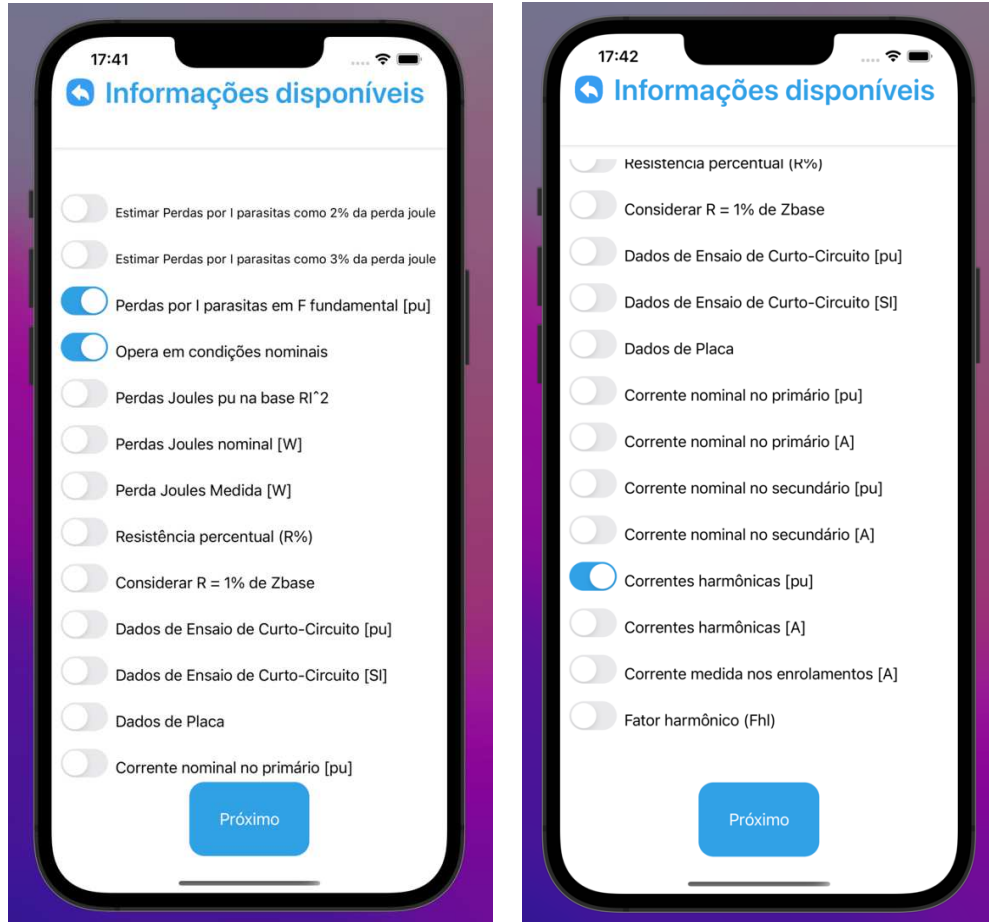


Figura 13: Preenchimento da primeira tela em conformidade com o exemplo em análise

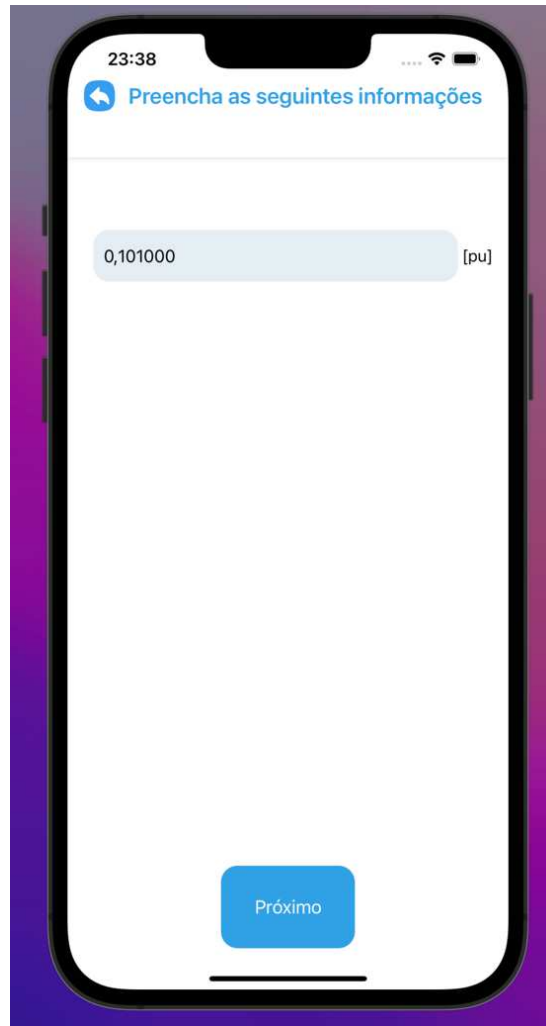


Figura 14: Preenchimento da segunda tela em conformidade com o exemplo em análise

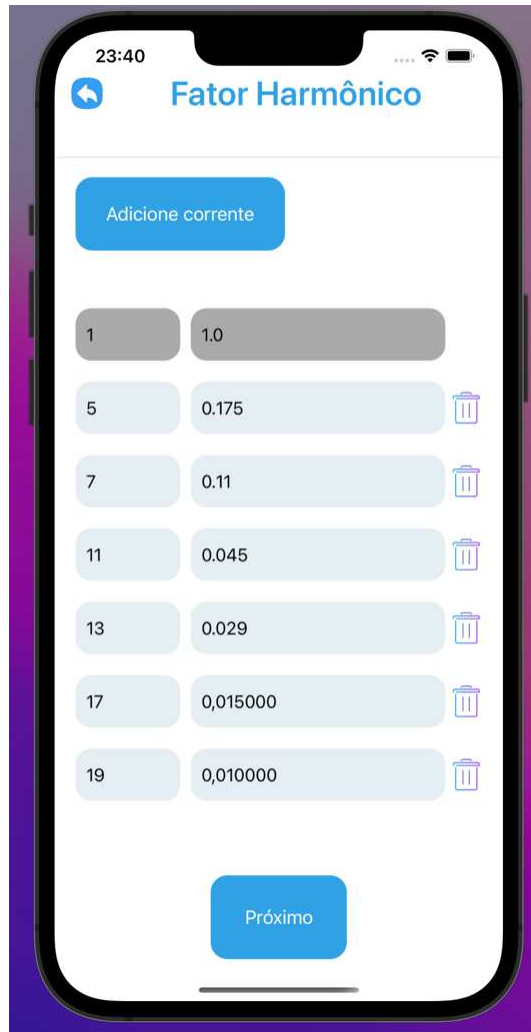


Figura 15: Preenchimento da terceira tela em conformidade com o exemplo em análise

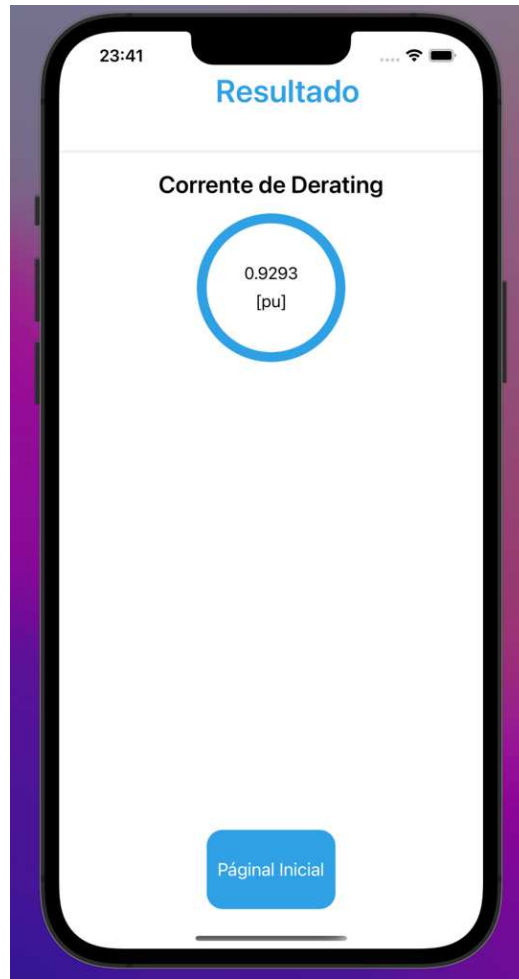


Figura 16: Tela de resultado da corrente de *derating* da aplicação, calculado a partir dos dados do exemplo em análise

5.2 Exemplo do capítulo 3 da referência 3

O Gráfico apresentado em Delaiba (1997) é dado pela figura 17, e a estimativa aproximada da expectativa de vida útil nele apresentada por cada norma, é dada pela tabela 4.

EXPECTATIVA DE VIDA - CLASSE 55

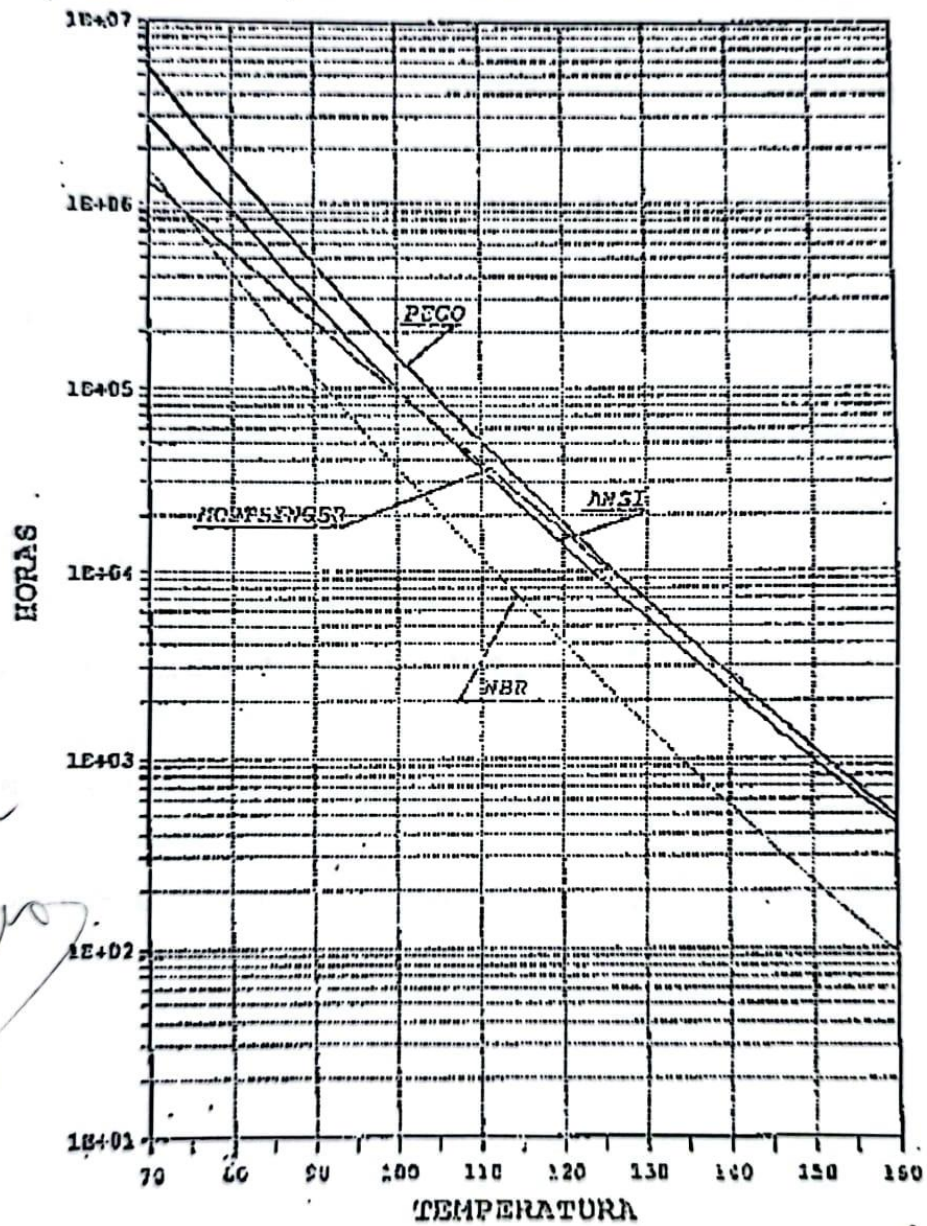
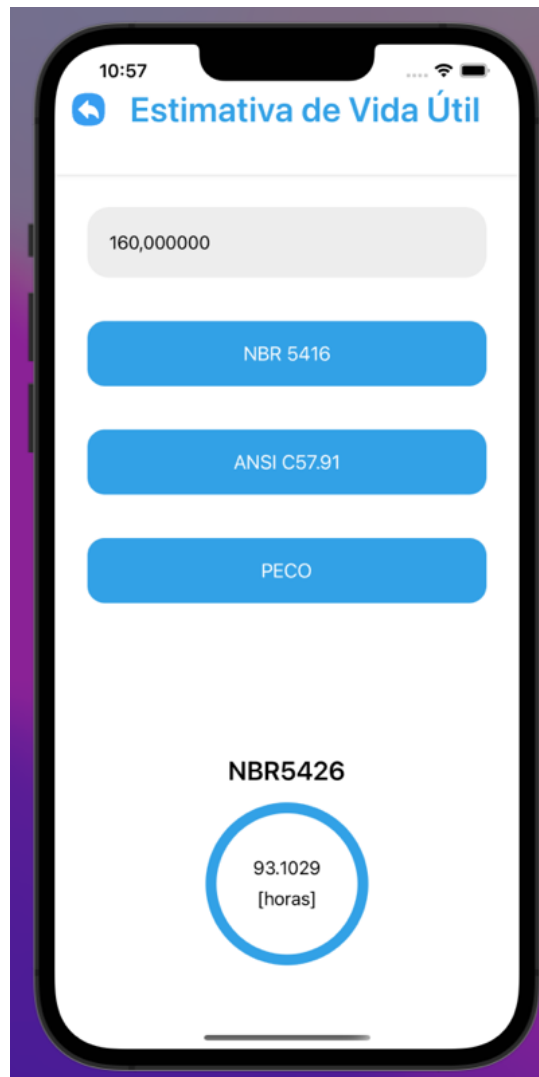


Figura 17: Gráfico de análise das expectativas de vida útil de transformadores (DELAIBA, 1997). O eixo x está em graus celsius

Tabela 4: Estimativa de vida útil para temperatura de 433 K segundo o gráfico 6.5

Norma	Expectativa aproximada da vida útil [horas] para uma temperatura de 433 K (95 °C), segundo o gráfico da figura 17
NBR	100
ANSI	470
PECO	490

**Figura 18:** Tela de resultado das expectativas de vida útil calculadas para uma temperatura de 433 K segundo a norma NBR 5416

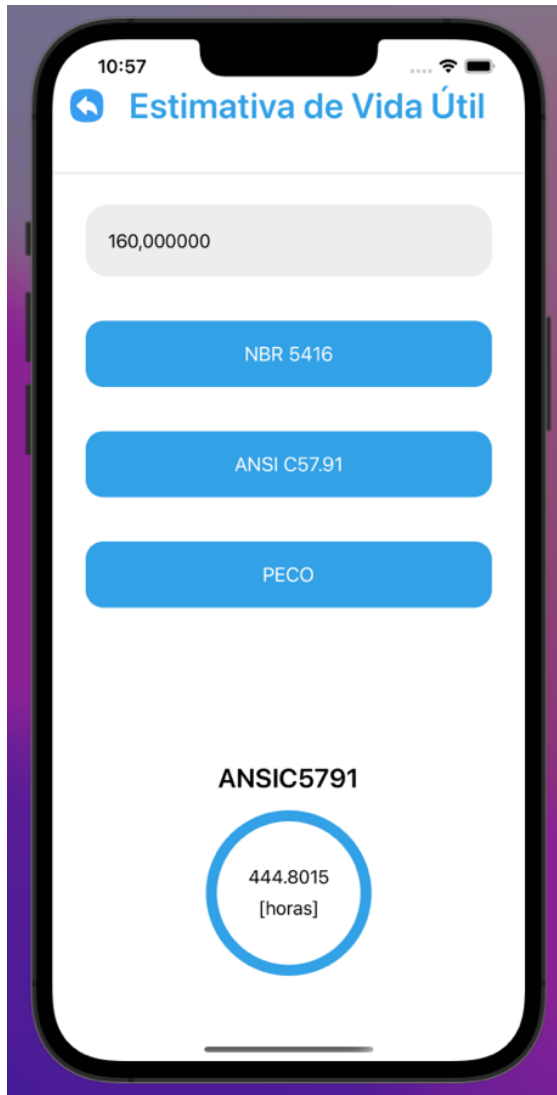


Figura 19: Tela de resultado das expectativas de vida útil calculadas para uma temperatura de 433 K segundo a norma ANSI C57.91

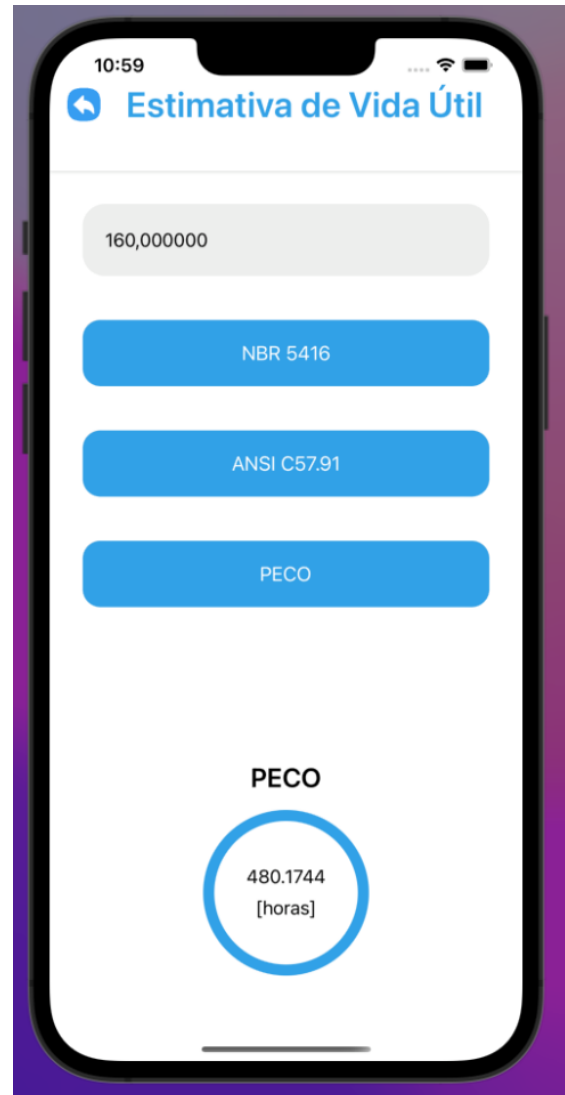


Figura 20: Tela de resultado das expectativas de vida útil calculadas para uma temperatura de 433 K segundo a norma PECO

Como demonstrado nas figuras anteriores, o aplicativo desenvolvido apresentou, em suas duas funcionalidades, resultados condizentes com as referências utilizadas neste estudo, o que permite que ele seja utilizado como uma ferramenta de análise de transformadores, visando sua preservação.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como intuito produzir uma aplicação iOS, que propiciasse uma ferramenta de cálculo da corrente de *derating* para transformadores que sofrem com o sobreaquecimento provocado por distorção harmônica, um fenômeno bastante presente em sistemas elétricos. O aplicativo desenvolvido também permite o cálculo da estimativa de vida útil de transformadores segundo três normas diferentes, o que possibilita averiguar o ganho de durabilidade por se aplicar a corrente recomendada, e assim evitar que o equipamento trabalhe acima da faixa de temperatura para qual foi desenvolvido.

Os testes demonstrados no capítulo 5 apresentaram resultados condizentes com as referências utilizadas, mostrando assim a aplicabilidade do programa desenvolvido. Espera-se que essa ferramenta possa ser útil na prática de engenharia, e que possa ser incrementada futuramente para abordar outros problemas da área. Algumas possibilidades para trabalhos futuros, dos quais o aplicativo pode se beneficiar são:

- Uma versão que funcione em dispositivos Android, para que seja mais acessível.
- Adicionar opções de cálculo com outras normas propostas.
- Adicionar outras funcionalidades, como *derating* para máquinas elétricas rotativas.
- Adicionar mais funcionalidades envolvendo análises de transformador, ou qualidade de energia.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Adalton L.; CAMACHO, José R. **Transformadores de potência**. Uberlândia: UFU, 2014.

CAMARGO, Jelson Machado de. **Análise do Desempenho Térmico e Vida Útil de Transformadores Alimentando Cargas Não Lineares**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2005.

DELAIBA, Antonio Carlos. **Comportamento de Transformadores com Cargas não Lineares: Uma Abordagem Analítica, Experimental e Numérica pelo Método dos Elementos Finitos**. Orientador: José Roberto Cardoso. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 1997.

DUGAN, Roger; MCGRANAGHAN, Mark; SANTOSO, Surya; WAYNE, H. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. [S. l.: s. n.], 2002. 528 p.

GUIMARÃES, Magno de Bastos; LISITA, Luiz Roberto; NERYS, José Wilson. **Comparativo entre métodos de cálculo de perdas em transformadores alimentando cargas não-lineares**. [S. l.]. jul. 2022.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents**. Nova York: 1988

SCHLABBACH, J.; BLUME, D.; STEPHANBLOME, T. **Voltage Quality in Electrical Power Systems**. Londres: The Institution of Engineering and Technology, 1999. 241 p.

YU, Angela. **IOS & Swift** - The Complete iOS App Development Bootcamp. [S. l.], 2021.

Disponível em: <https://www.udemy.com/course/ios-13-app-development-bootcamp/learn/lecture/12409354#overview>. Acesso em: 2 maio 2022.