



O PORTAL DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA



BEM-VINDOS AO WEBINAR

“Estado da Arte de Transformadores Eficientes nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica”

Parte 3: Transformadores Monofásicos Rurais e Impedância Percentual

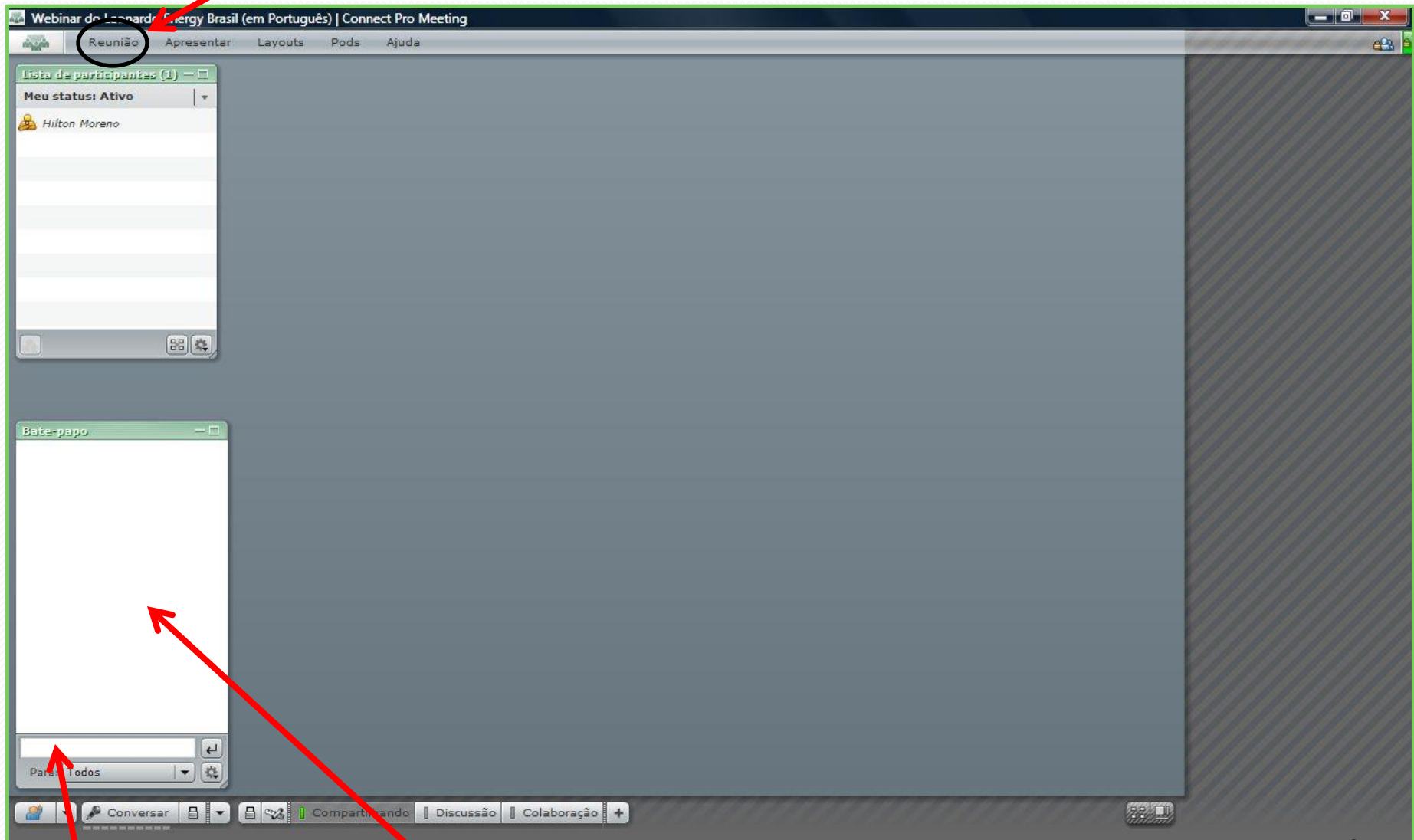
Apresentador: Engº Arimatéa Araújo Nunes

Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá

www.unifei.edu.br



1. Teste de som: Reunião → Gerenciar minhas configurações → Assistente de configuração de áudio → Sigam as instruções.



3. Digitem aqui

2. Espaço para apresentação pessoal , eventuais perguntas e/ou comentários - respostas no final da apresentação.



O PORTAL DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA



PRINCIPAIS REGRAS DESTE WEBINAR:

- **As perguntas e/ou comentários deverão ser feitas unicamente por escrito, utilizando-se o campo apropriado;**
- **Perguntas e/ou comentários podem ser enviadas durante o desenvolvimento da apresentação, mas serão respondidas somente após o final da mesma;**
- **Pode acontecer que, dependendo do número de perguntas e do tempo disponível, algumas perguntas fiquem sem resposta durante o webinar;**
- **Se houver interrupção inesperada do webinar, certifique-se que sua conexão com a internet esteja funcionando normalmente e tente se conectar novamente;**
- **Não é emitido certificado de participação no webinar.**

PALESTRANTE: Engº Arimatéa Nunes

Arimatéa Araújo Nunes nasceu em 1983 em Campina Grande, Paraíba. Recebeu o diploma de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Campina Grande em 2009. Atualmente é aluno de Mestrado na Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais.

MEDIADOR: Engº Eduardo Gradiz

Consultor do Procobre – Instituto Brasileiro do Cobre



Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Sistemas Elétricos e de Energia
Laboratório de Alta Tensão



Estado da Arte de Transformadores Eficientes nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica

Parte 3: Transformadores Monofásicos Rurais e Impedância Percentual

Eng^o Arimatéa Araújo Nunes

Sob orientação do **Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez**, coordenador do Laboratório de Alta Tensão e do Grupo de Estudos sobre Transformadores Eficientes da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).



SUMÁRIO

- Introdução;
- Banco de Dados Utilizado na Pesquisa;
- Aplicação de Transformadores em Zonas Rurais;
- Tempo Suprindo Máxima Potência – TSMP;
- Projeto de Transformadores Monofásicos;
- Impedância Percentual;
- Análise Financeira dos Transformadores Projetados;
- Considerações Finais.



Introdução

- Transformadores representam um terço das perdas em sistemas de distribuição e transmissão.
- Transformadores de distribuição monofásicos utilizados na zona rural:
 - Perfil de clientes de baixa demanda;
- Perdas nos transformadores utilizados nestas regiões:
 - Em carga;
 - Em vazio.



Introdução

- Transformadores eficientes para zona rural:
 - Redução das perdas em vazio:
 - Projeto do núcleo.
 - Os transformadores devem ser adequados aos limites impostos pela NBR 5440.
- Soluções para a efficientização:
 - Transformadores eficientes padrão:
 - Núcleo com lâminas de aço-silício.
 - Manipulação da Impedância Percentual:
 - Visando o aumento da resistência percentual.



Banco de Dados Utilizado na Pesquisa

- A análise do comportamento das cargas rurais foi concretizada a partir de um estudo estatístico para o TSMP e para a demanda máxima dos dados coletados de 69 transformadores monofásicos da rede de concessão da AES Sul:
 - 10 unidades de 5 kVA;
 - 30 unidades de 10 kVA;
 - 29 unidades de 15 kVA.



Banco de Dados Utilizado na Pesquisa

- Os transformadores do banco de dados da AES Sul estavam localizados na zona rural;
- Os transformadores foram analisados partindo de um agrupamento de dados segundo a potência nominal, ou seja, 5 kVA, 10 kVA e 15 kVA. Todavia, para o estudo realizado e descrito nesta apresentação, optou-se apenas por utilizar os transformadores com potência nominal de 10 kVA e classe isolamento de 15 kV.

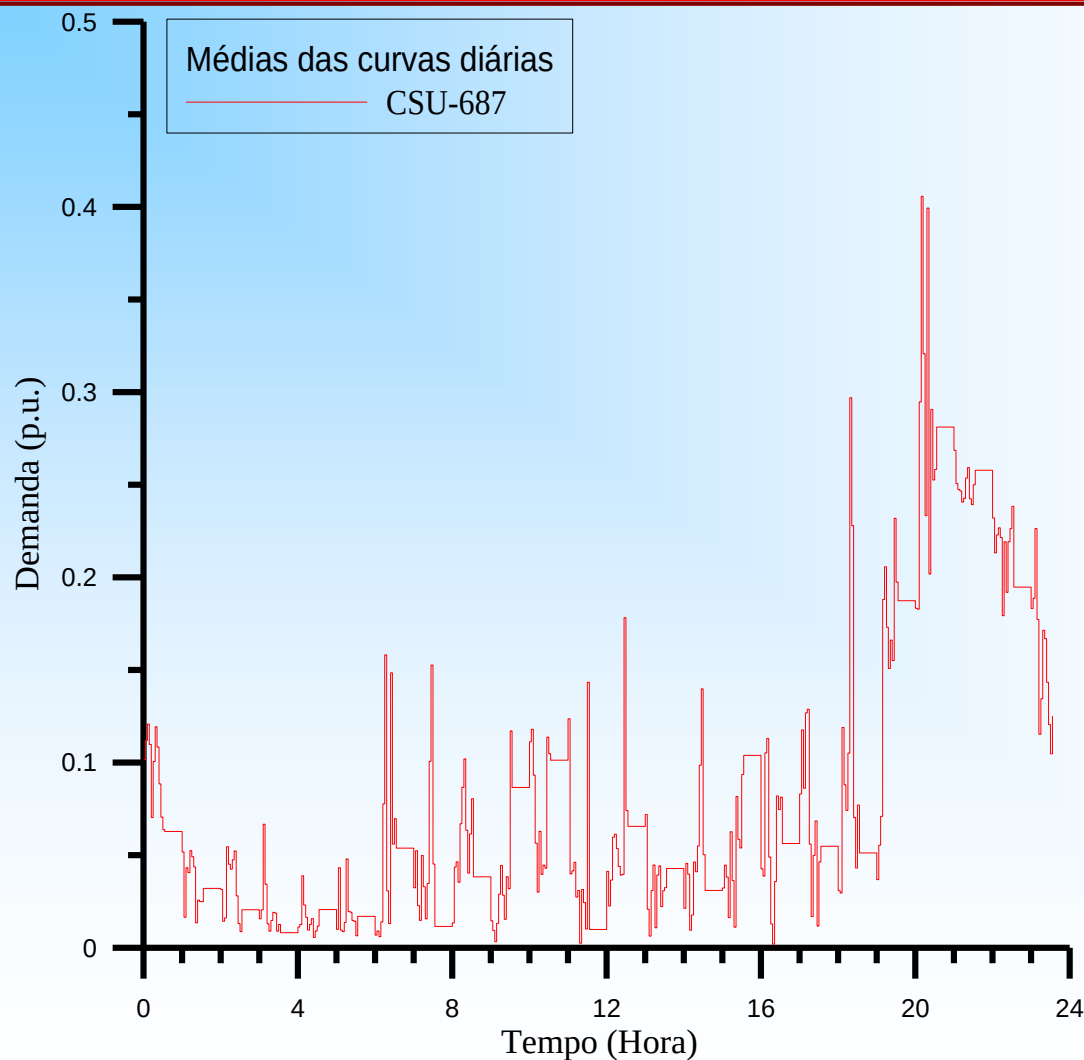


Aplicação de Transformadores em Zonas Rurais

- O perfil de carga dos clientes localizados na zona rural, que compõe a área de concessão da empresa, foi levantado através de um estudo realizado pelo LAT-EFEI, no âmbito de um P&D em parceria com AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A.
- A partir deste estudo, obteve-se um TSMP médio (Tempo Suprindo Máxima Potência) de 1 hora/dia.

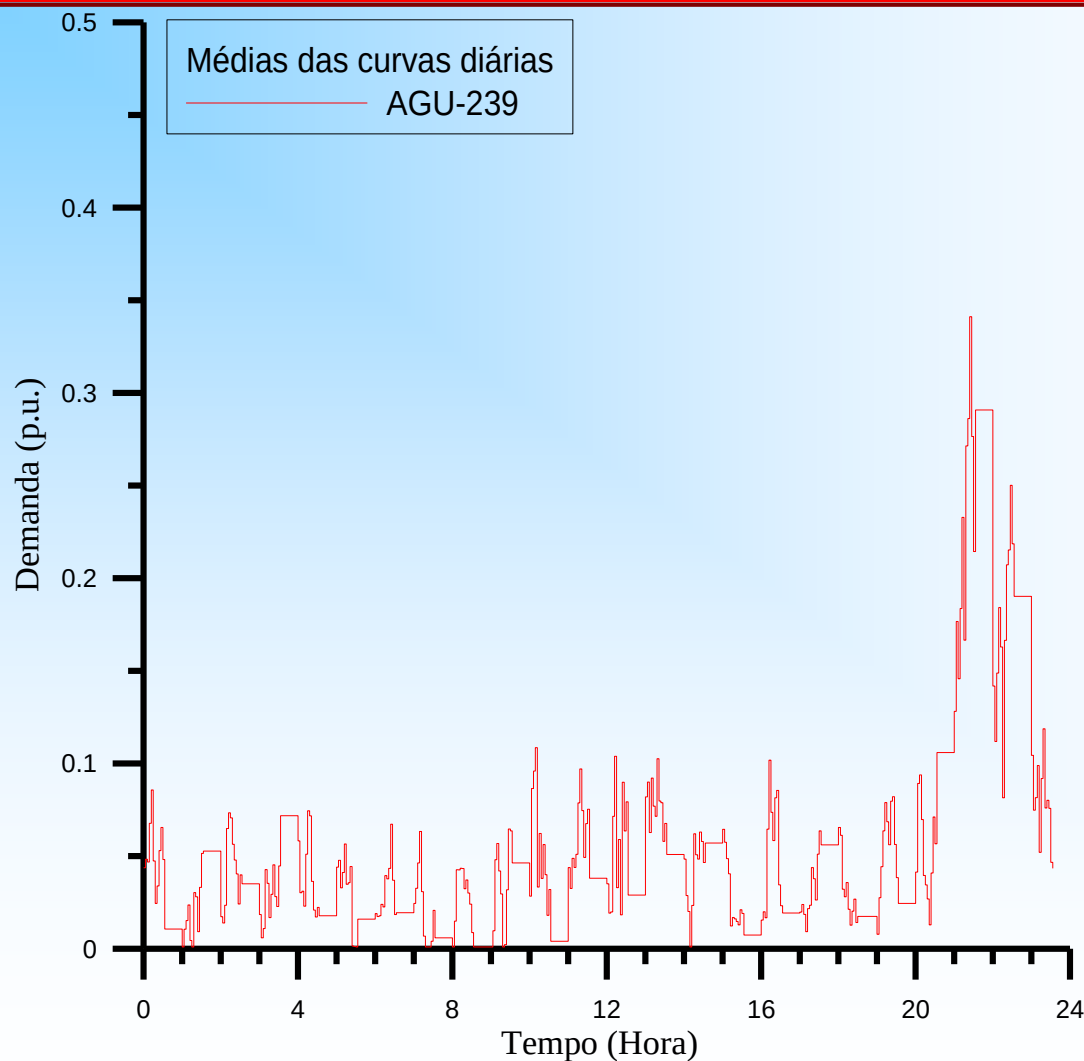


Aplicação de Transformadores em Zonas Rurais



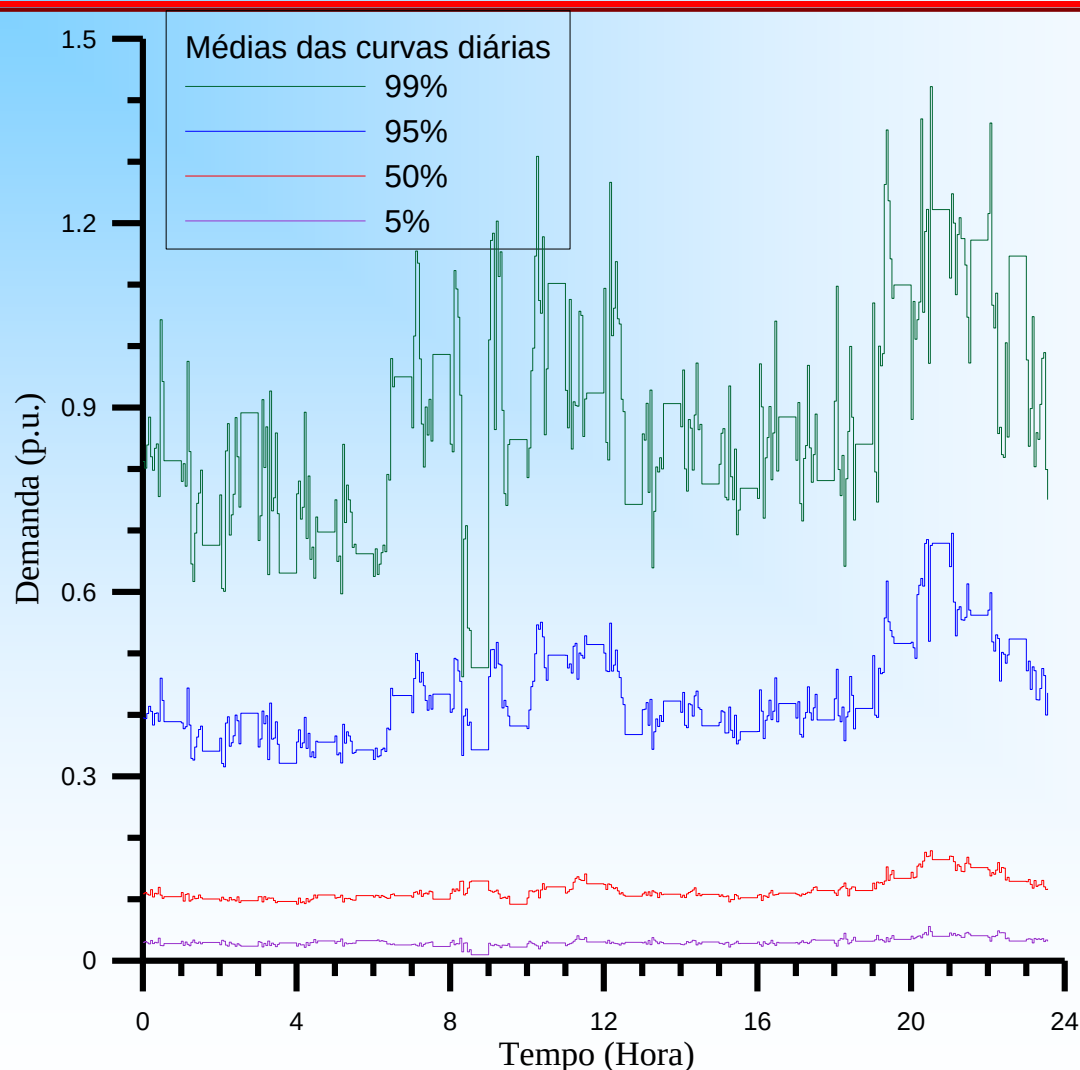


Aplicação de Transformadores em Zonas Rurais





Aplicação de Transformadores em Zonas Rurais





Tempo Suprindo Máxima Potência - TSMP

- TSMP (Tempo Suprindo Máxima Potência) reflete, em termos comparativos, o tempo equivalente, em horas/dia, que o transformador opera sob potência nominal, ou seja, o TSMP indica o tempo total durante um dia (24 horas) que o transformador operando a plena carga necessita para apresentar as perdas série de um ciclo normal de carga média.



Tempo Suprindo Máxima Potência - TSMP

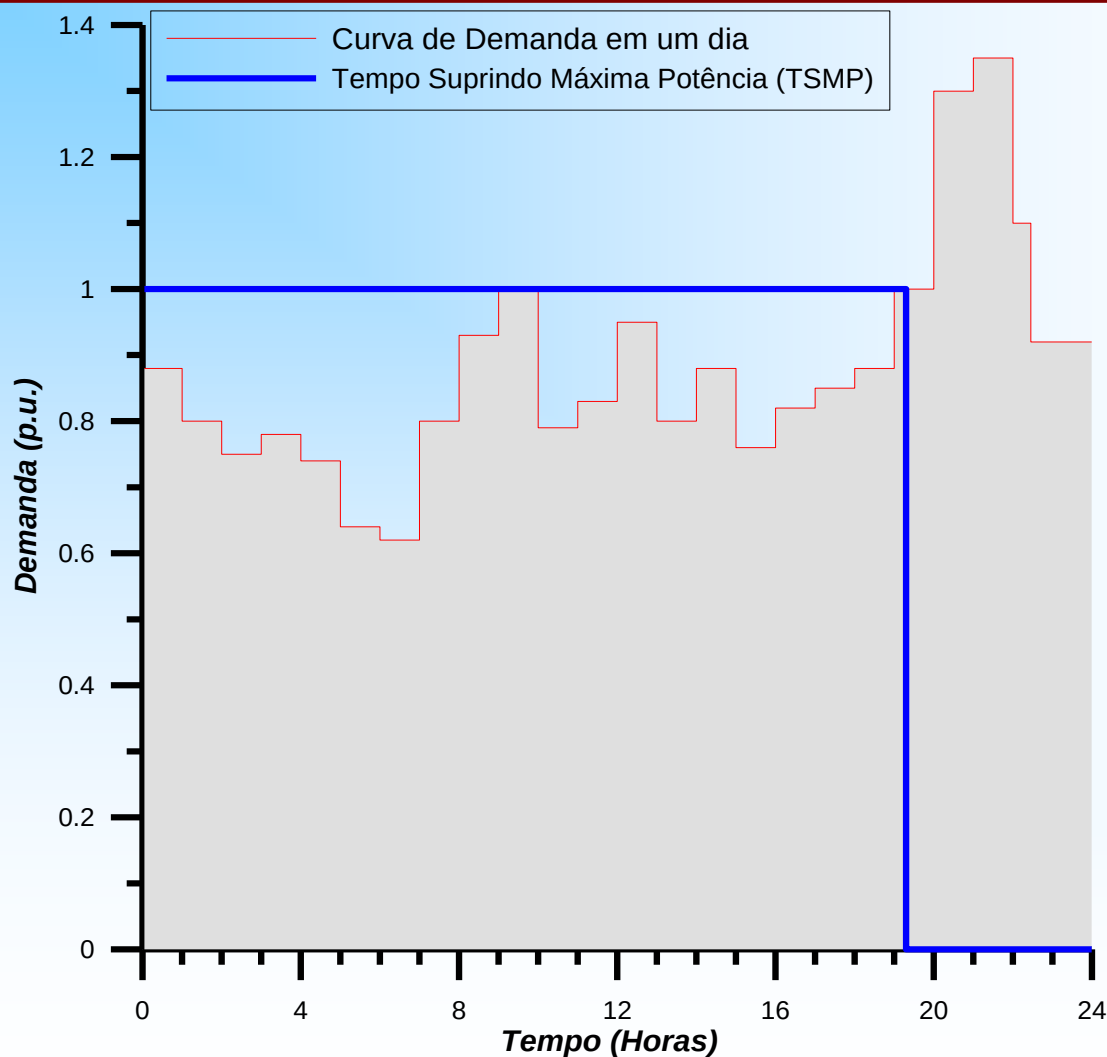
$$TSMP = \frac{24}{n_d} \cdot \sum_{i=1}^{n_d} \left(\frac{S_i}{S_n} \right)^2$$

- n_d é o número de intervalos de tempo utilizados para discretizar a carga diária;
- S_i é a potência instantânea (W);
- S_n é a potência nominal (W);



Tempo Suprindo Máxima Potência

Potência - TSMP





Projeto de Transformadores Monofásicos

- TSMP utilizado: 1 hora/dia;
- Rotina utilizada para o desenvolvimento dos projetos;
 - Monofásicos e trifásicos:
 - 5 rotinas;
 - 2 grupos desenvolvendo 11 projetos cada, para cada rotina;
 - Sendo 22 projetos por rotina, totalizando 110 projetos para as 5 rotinas;
 - Monofásicos com impedância percentual otimizada:
 - Adaptação da rotina para transformadores monofásicos e trifásicos;
 - Atualmente 1 rotina desenvolvendo 21 projetos com seção do núcleo constante;
 - Rotina com variação da seção do núcleo em fase final de desenvolvimento, produzindo 121 projetos, sendo escolhidos na otimização apenas 11.



Projeto de Transformadores Monofásicos

- Detalhes dos Projetos dos Transformadores Monofásicos:
 - Terminal AT: conexão fase-fase (13,8 kV);
 - Terminal BT: um nível de tensão (220 V);
 - Núcleo convencional, formado por 2 colunas, composto por lâminas de aço-silício de grão-orientado;
 - 2 bobinas, uma em cada coluna, conectadas em série, uma AT e ou BT, concêntricas;
 - Seção dos condutores AT e BT, circular e retangular, respectivamente. Ambos os condutores de cobre;



Projeto de Transformadores Monofásicos

- Método utilizado para desenvolver os transformadores monofásicos:
 - Transformador de referência, obtido de acordo com os limites impostos pela norma NBR 5440;
 - Variação de parâmetros do transformador de referência:
 - Quantidade de espiras por enrolamento;
 - Quantidade de camadas na baixa tensão.



Projeto de Transformadores Monofásicos

- Projetos desenvolvidos:

Projetos	Perdas no Cobre (W)	Perdas no Núcleo (W)	Perdas Totais (W)	Impedância Percentual
ABNT	-	60	260	2,5
Projeto Padrão	202,72	61,82	264,54	2,35
Projeto_1	243,27	40,10	283,37	2,84
Projeto_2	239,21	41,56	280,77	2,79
Projeto_3	235,16	43,13	278,29	2,74
Projeto_4	231,10	44,83	275,94	2,69
Projeto_5	227,05	46,67	273,72	2,64



Projeto de Transformadores Monofásicos

○ Projetos desenvolvidos (Continuação):

Projetos	Perdas no Cobre (W)	Perdas no Núcleo (W)	Perdas Totais (W)	Impedância Percentual
ABNT	-	60	260	2,5
Projeto Padrão	202,72	61,82	264,54	2,35
Projeto_6	223,00	48,67	271,67	2,60
Projeto_7	218,94	50,85	269,79	2,55
Projeto_8	214,89	53,23	268,11	2,50
Projeto_9	210,83	55,83	266,66	2,45
Projeto_10	206,78	58,68	265,46	2,40



Projeto de Transformadores Monofásicos

- Projetos desenvolvidos (Continuação):

Projetos	Perdas no Cobre (W)	Perdas no Núcleo (W)	Perdas Totais (W)	Impedância Percentual
ABNT	-	60	260	2,5
Projeto Padrão	202,72	61,82	264,54	2,35
Projeto_11	262,23	34,18	296,41	3,88
Projeto_12	257,86	35,48	293,33	3,81
Projeto_13	253,49	36,87	290,36	3,74
Projeto_14	249,12	38,38	287,49	3,67
Projeto_15	244,75	40,01	284,76	3,60



Projeto de Transformadores Monofásicos

○ Projetos desenvolvidos (Continuação):

Projetos	Perdas no Cobre (W)	Perdas no Núcleo (W)	Perdas Totais (W)	Impedância Percentual
ABNT	-	60	260	2,5
Projeto Padrão	202,72	61,82	264,54	2,35
Projeto_16	240,38	41,79	282,16	3,54
Projeto_17	236,00	43,72	279,73	3,47
Projeto_18	231,63	45,83	277,47	3,40
Projeto_19	227,26	48,14	275,41	3,33
Projeto_20	222,89	50,68	273,57	3,26
Projeto_21	218,52	53,47	271,99	3,19



Impedância Percentual

- A impedância percentual, também chamada de impedância de curto-circuito, é um parâmetro que representa a percentagem da tensão nominal que se aplicada ao primário de um transformador, implica na circulação da corrente nominal no secundário sob curto circuito, ou seja, a queda de tensão apresentada.
- A impedância de curto-circuito é composta por duas parcelas: a reatância percentual de dispersão e a resistência percentual.



Impedância Percentual

- Uma solução alternativa para a redução das perdas no núcleo consiste em aumentar a impedância percentual. Isto se dá através do acréscimo do número de espiras inicial, implicando em menor indução magnética, devido a redução do fluxo magnético, que por fim, resulta em menores perdas em vazio, considerando a seção do núcleo constante.

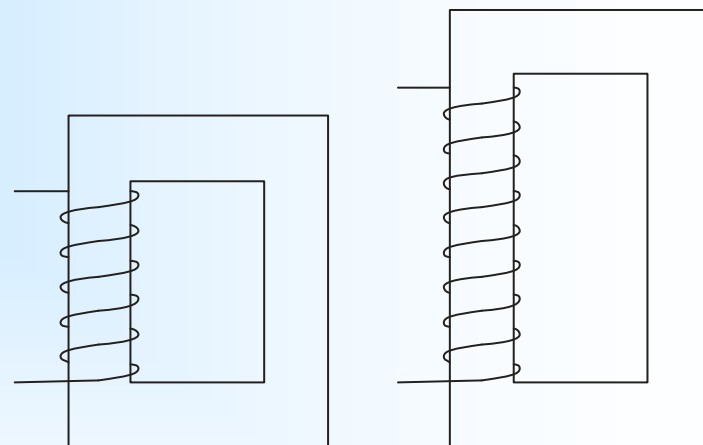


Impedância Percentual

- Manipulação do número de espiras, elevando-o, implicando assim no aumento da resistência percentual.

$$ns = \frac{10^8 \times (TS / 2)}{4,44 \times f \times \varphi}$$

onde ***ns*** é o número de espiras do secundário;
TS é a tensão do secundário em (V); ***f*** é
frequência (Hz) e ***φ*** é o fluxo no núcleo
(Maxwells).



Aumento da coluna devido ao
aumento do número de espiras.



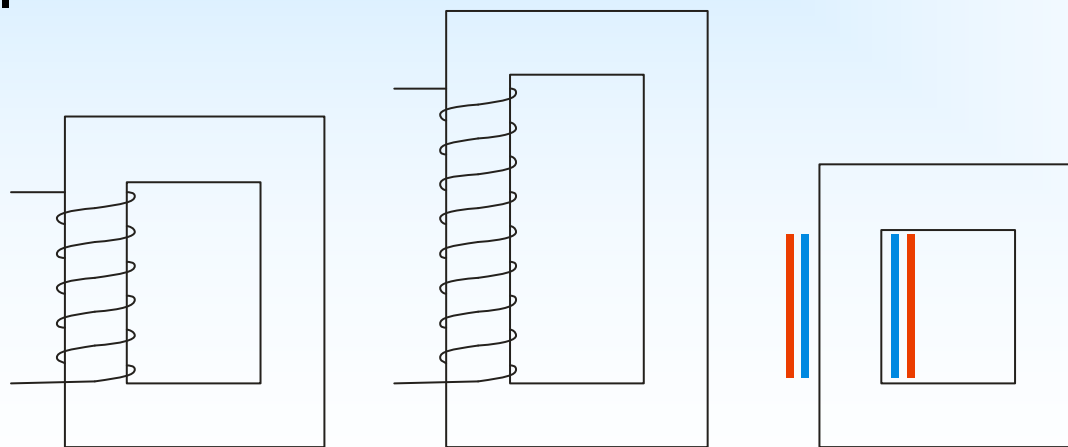
Impedância Percentual

- Elevando-se a impedância percentual, as perdas nominais sob carga acabam sendo elevadas, o que pode ser considerado de menor importância, uma vez que o transformador opera com carregamento reduzido.
- Analisando a influência da impedância percentual nos projetos de transformadores monofásicos com baixo carregamento, percebeu-se que o seu aumento resulta em transformadores que podem trabalhar com uma menor densidade de fluxo.



Impedância Percentual

- Conseguiu-se reduzir ainda mais as perdas em vazio dos projetos desenvolvidos, através do aumento do número de camadas das bobinas BT e AT, que implica diretamente na altura da bobina, reduzindo-a, resultando em uma menor altura de janela, implicando também uma menor massa de aço-silício utilizada.





Impedância Percentual

- Análise do aumento da impedância percentual para os projetos desenvolvidos:

Projetos	Espiras BT	Perdas no Núcleo (W)	Indução na coluna (Gauss)	Resistência Percentual	Impedância Percentual
Projeto Padrão	51,33	61,82	16750,00	2,03	2,35
Projeto_1	61,59	40,10	13958,33	2,43	2,84
Projeto_2	60,57	41,56	14194,92	2,39	2,79
Projeto_3	59,54	43,13	14439,66	2,35	2,74
Projeto_4	58,52	44,83	14692,98	2,31	2,69
Projeto_5	57,49	46,67	14955,36	2,27	2,64



Impedância Percentual

- Análise do aumento da impedância percentual para os projetos desenvolvidos (continuação):

Projetos	Espiras BT	Perdas no Núcleo (W)	Indução na coluna (Gauss)	Resistência Percentual	Impedância Percentual
Projeto Padrão	51,33	61,82	16750,00	2,03	2,35
Projeto_6	56,46	48,67	15227,27	2,23	2,60
Projeto_7	55,44	50,85	15509,26	2,19	2,55
Projeto_8	54,41	53,23	15801,89	2,15	2,50
Projeto_9	53,38	55,83	16105,77	2,11	2,45
Projeto_10	52,36	58,68	16421,57	2,07	2,40



Impedância Percentual

- Análise do aumento da impedância percentual para os projetos desenvolvidos (continuação):

Projetos	Espiras BT	Perdas no Núcleo (W)	Indução na coluna (Gauss)	Resistência Percentual	Impedância Percentual
Projeto Padrão	51,33	61,82	16750,00	2,03	2,35
Projeto_11	61,59	34,18	13958,33	2,62	3,88
Projeto_12	60,57	35,48	14194,92	2,58	3,81
Projeto_13	59,54	36,87	14439,66	2,53	3,74
Projeto_14	58,52	38,38	14692,98	2,49	3,67
Projeto_15	57,49	40,01	14955,36	2,45	3,60



Impedância Percentual

- Análise do aumento da impedância percentual para os projetos desenvolvidos (continuação):

Projetos	Espiras BT	Perdas no Núcleo (W)	Indução na coluna (Gauss)	Resistência Percentual	Impedância Percentual
Projeto Padrão	51,33	61,82	16750,00	2,03	2,35
Projeto_16	56,46	41,79	15227,27	2,40	3,54
Projeto_17	55,44	43,72	15509,26	2,36	3,47
Projeto_18	54,41	45,83	15801,89	2,32	3,40
Projeto_19	53,38	48,14	16105,77	2,27	3,33
Projeto_20	52,36	50,68	16421,57	2,23	3,26
Projeto_21	51,33	53,47	16750,00	2,19	3,19



Impedância Percentual

- Análise do aumento da impedância percentual para os projetos desenvolvidos (continuação):

Projetos	Espiras BT	Perdas no Núcleo (W)	Indução na coluna (Gauss)	Resistência Percentual	Impedância Percentual
Projeto Padrão	51,33	61,82	16750,00	2,03	2,35
Projeto_21	51,33	53,47	16750,00	2,19	3,19
Projeto_1	61,59	40,10	13958,33	2,43	2,84
Projeto_11	61,59	34,18	13958,33	2,62	3,88
Projeto_4	58,52	44,83	14692,98	2,31	2,69
Projeto_14	58,52	38,38	14692,98	2,49	3,67
Projeto_8	54,41	53,23	15801,89	2,15	2,50
Projeto_18	54,41	45,83	15801,89	2,32	3,40



Análise Financeira dos Transformadores Projetados

- Composição dos Custos dos Transformadores
 - **Custo de Manufatura**: Custo para a compra do transformador eficiente junto ao fornecedor.
 - Aço-silício;
 - Cobre;
 - Tanque;
 - Mão-de-obra;
 - Outros componentes do transformador;
 - Despesas diversas com a fabricação do equipamento;
 - Impostos;
 - Lucro.



Análise Financeira dos Transformadores Projetados

- Composição dos Custos dos Transformadores (continuação):
 - **Custo Total**: Custo de manufatura do transformador adicionado aos custos das perdas capitalizadas.
 - Período de vida útil do equipamento de 20 anos;
 - Tempo de análise de 10 anos;
 - Taxa de juros de 8% a.a.;
 - TSMP igual a 1 hora/dia.



Análise Financeira dos Transformadores Projetados

- Custo de manufatura e custo total dos transformadores projetados:

Projetos	Preço de Manufatura (R\$)	Custo Total (Perdas capitalizadas) (R\$)
Projeto Padrão	1134,98	1250,65
Projeto_1	1198,59	1158,75
Projeto_2	1192,23	1163,12
Projeto_3	1185,87	1168,26
Projeto_4	1179,51	1174,26
Projeto_5	1173,15	1181,23



Análise Financeira dos Transformadores Projetados

- Custo de manufatura e custo total dos transformadores projetados:

Projetos	Preço de Manufatura (R\$)	Custo Total (Perdas capitalizadas) (R\$)
Projeto Padrão	1134,98	1250,65
Projeto_6	1166,78	1189,26
Projeto_7	1160,42	1198,49
Projeto_8	1154,06	1209,06
Projeto_9	1147,70	1221,14
Projeto_10	1141,34	1234,92



Análise Financeira dos Transformadores Projetados

- Custo de manufatura e custo total dos transformadores projetados:

Projetos	Preço de Manufatura (R\$)	Custo Total (Perdas capitalizadas) (R\$)
Projeto Padrão	1134,98	1250,65
Projeto_11	1175,31	1108,17
Projeto_12	1169,65	1111,82
Projeto_13	1164,00	1116,15
Projeto_14	1158,34	1121,25
Projeto_15	1152,69	1127,21



Análise Financeira dos Transformadores Projetados

- Custo de manufatura e custo total dos transformadores projetados:

Projetos	Preço de Manufatura (R\$)	Custo Total (Perdas capitalizadas) (R\$)
Projeto Padrão	1134,98	1250,65
Projeto_16	1147,03	1134,11
Projeto_17	1141,38	1142,09
Projeto_18	1135,73	1151,25
Projeto_19	1130,07	1161,77
Projeto_20	1124,42	1173,81
Projeto_21	1118,76	1187,57



Considerações Finais

- Transformador com núcleo amorfo:
 - Via de regra, equipamentos com tal tecnologia apresentam custos elevados se comparados a um transformador padrão convencional.
- Transformador eficiente convencional:
 - Também apresenta custo elevado, visto que é utilizada maior quantidade de aço-silício. Apesar de apresentar custos superiores, como estes são, normalmente, inferiores aos transformadores com núcleos amorfos ainda se verifica a existência de viabilidade econômica.



Considerações Finais

- Transformador com impedância percentual incrementada:
 - O aumento da impedância pode resultar em um transformador eficiente para aplicação em zona rural com clientes de perfil de baixo carregamento, e ainda pode apresentar custo inferior ao custo do transformador padrão.
- Algumas unidades monofásicas projetadas de acordo com o estudo desenvolvido neste artigo estão sendo adquiridas. Os transformadores serão instalados na rede de concessão da AES Sul para que as soluções propostas possam ser avaliadas.



Dúvidas e Contato



Arimatéa Araújo Nunes

nunesarimatea@lat-efei.org.br

(35)9920-1410/ (35) 3622-3546