



Fusíveis para proteção de range completo para transformadores tipo pedestal até 20 MVA e 72.5kV para aplicações renováveis

Tema: Redes e Linhas subterrâneas

Autores: Orlando Giraldo - Engenheiro Consultor Sênior na The H-J Family of Companies

Co-Autores: -

Empresa: The H-J Family of Companies

Resumo

As turbinas eólicas normalmente operam potências da ordem de 5 MW em níveis de tensão de 34,5 kV no máximo; no entanto, a crescente demanda por energia renovável aumentou a capacidade de geração atualmente para 14 MW por turbina e espera-se que atinja 20 MW até 2030 em níveis de tensão de 72,5 kV. Essas mudanças serão acompanhadas por um aumento da potência dos transformadores elevadores tipo Pedestal até cerca de 20 MVA e com isso uma demanda de componentes para classificações de corrente e tensão mais altas, como no caso de buchas de AT e BT.

Junto com a demanda por componentes com maiores correntes e classes de tensão, as seguintes mudanças estão acontecendo na demanda por componentes:

- Fusíveis limitadores de corrente de 38kV e fusíveis de expulsão de 34,5kV precisarão ser atualizados para fusíveis de classe 42 kV para sistemas de classe 72,5 kV em estrela aterrada. A conexão delta não é considerada.
- Este trabalho técnico mostra como ambos fusíveis precisarão expandir suas correntes nominais atuais para até 350 amperes e capacidade de interrupção para classes de tensão até 42 kV para uma faixa entre 2 kA e 3 kA para poder cobrir transformadores com potência até 20.000kVA.

Este trabalho analisa a atualização necessária dos fusíveis imersos em óleo de média tensão usados para proteger transformadores até 20 MVA e tensões de até 72,5 kV em estrela aterrada ou conexão delta de 42 kV usando coordenação de range completo composta por fusíveis de expulsão imersos em óleo e fusíveis limitadores de corrente de backup.

1. Introdução

O desenvolvimento atual de turbinas eólicas de até 14 MW e o aumento esperado desses tamanhos revelaram limitações dos fusíveis imersos em óleo de média tensão normalmente usados para proteger transformadores tipo pedestal para essas aplicações, forçando o uso de chaves fusíveis separadas e caras. Este trabalho ilustra as limitações atuais e analisa novas possibilidades e limites para continuar usando fusíveis imersos em óleo para proteção confiável de toda a faixa de transformadores tipo pedestal grandes a um custo menor.

Para tanto, se faz necessário elucidar alguns termos e nomenclaturas importantes na análise e seletividade destes tipos de fusíveis, tais como:

Ponto de cruzamento: Na coordenação de fusíveis de expulsão (EF) e fusíveis limitadores de corrente (CLF), o tempo e a corrente (tempo de cruzamento e corrente de cruzamento) apontam onde o cruzamento das 2 curvas de fusíveis em comparação acontece. À esquerda do ponto de cruzamento de corrente, o EF tem tempos de operação mais baixos e à direita do ponto de cruzamento de corrente, o CLF opera mais rápido que o EF.

Proteção de range completo: Range completo é um conceito de coordenação de proteção feito com um ou mais dispositivos de proteção para cobrir as 3 áreas de sobrecorrente do transformador:

- Sobrecargas
- Curto-circuito externo (secundário)
- Falha interna

Neste trabalho, transformadores tipo pedestal com grandes potências usados para aplicações de energia renovável são protegidos em range completo, usando uma combinação em série de um fusível de expulsão e um fusível limitador de corrente de backup imersos em óleo isolante.

2. Desenvolvimento

2.1 Análise das limitações de Corrente de fusíveis imersos em óleo para proteção de range completo de transformadores tipo pedestal – Correntes máximas disponíveis, níveis de tensão e KVA máximo do transformador a ser protegido.

2.1.1 Limitações de níveis de corrente e tensão

A Tabela 1 mostra as limitações típicas de fusíveis imersos em óleo disponíveis comercialmente para aplicações de energia renovável. Esta tabela traz alguns tópicos para discussão:

a) A maioria dos transformadores elevadores usados para aplicações de energia renovável tem um enrolamento conectado em delta de alta tensão de classe 34,5 kV. No entanto, todas os níveis de tensão mostradas na tabela podem ser usadas com conexão delta ou estrela não aterrada e aterrada dos enrolamentos.

b) Fusíveis em paralelo são uma prática antiga amplamente discutida na norma IEEE Std C37.48™-2020, especialmente o numeral 5.1.5 “Current rating and interrupting capacity considerations for fuses in parallel”. Neste trabalho, são analisadas as oportunidades de aumentar o limite máximo de kVA do transformador usando fusíveis imersos em óleo em paralelo.

c) Fusíveis de classe de tensão 48,3 kV e 72,5 kV (níveis de kV preferenciais conforme norma IEEE Std. C37.46-2010): A Tabela 1 não inclui fusíveis imersos em óleo de classe 48,3 kV nem de 72,5 kV porque eles não são oferecidos atualmente no mercado. Neste trabalho, revisaremos a possibilidade de atualizar

fusíveis imersos em óleo de 38 kV atualmente usados para fusíveis de 41,9 kV para serem usados em sistemas de 72,5 kV aterrados solidamente.

Tabela 1 - Níveis de corrente e tensão comercialmente disponíveis para fusíveis

NÍVEIS DE CORRENTE E TENSÃO PARA FUSÍVEIS COMERCIALMENTE DISPONÍVEIS PARA APLICAÇÃO RENOVÁVEL					
FUSÍVEIS LIMITADORES DE CORRENTE TIPO BACK-UP VALORES MÁXIMOS					
kV	8.3	15.5/17.2	23/25.5	38	Notas
Corrente (A)	250	180	165	165	Aplicação corpo único
Corrente (A)	500	300	330	200	Aplicação em paralelo
FUSÍVEIS DE EXPULSÃO (CORPO ÚNICO) VALORES MÁXIMOS					
kV	8.3	15.5/17.2	23/25.5	38	Notas
Corrente (A)	140 (*1)	140 (*1)	140 (*1)	65	Fusível baioneta
Corrente (A)	48	230-272 (*2)	28	102 (*3)	Fusível Weak Link
(*1) Nível máximo para fusíveis tipo Fault Sensing (*2) Fusíveis de expulsão de classe de tensão de 15,5 kV são classificados para 230 A. A ERMCO tem um fusível útil para aplicações renováveis de alto kVA classificado para 272 A. Consulte a literatura da ERMCO para fusíveis família WLD. (*3) Com base em catálogos comerciais de Protective Link					

2.1.2 Limitações de kVA

A proteção de alcance total de transformadores tipo pedestal usando fusíveis imersos em óleo em paralelo vai atualmente até 35kV, 8MVA usando nossa ferramenta da web de coordenação de fusíveis. Neste trabalho, analisamos possibilidades de aumentar esse limite para obter o uso de fusíveis sob óleo em níveis de kVA muito mais altos para evitar o uso de chave fusíveis em separado e caras. Com base nos desenvolvimentos atuais, espera-se que os transformadores tipo pedestal para aplicações renováveis cresçam no futuro próximo até o nível de 20MVA.

2.2 Noções básicas sobre proteções de range completo para transformadores tipo pedestal e razões para limitação de kVA.

2.2.1 Regras de coordenação de fusíveis de range completo de transformadores tipo pedestal:

- O arranjo dos fusíveis deve proteger o transformador em qualquer uma das 3 zonas de sobrecorrente na Figura 1.
- A curva de Tempo Mínimo de Fusão (MMT) do fusível de expulsão (EF) deve permanecer o tempo todo à direita da linha da corrente de magnetização *inrush* do transformador descrita nas Figuras 2 e 3.
- As curvas dos fusíveis EF e CLF devem se cruzar em um ponto de corrente (ponto de cruzamento) que atenda às 2 condições a seguir:
 - O valor de amperes de intersecção deve ser maior do que a corrente mínima de interrupção (IR) do CLF e menor do que o IR máximo do EF.

ii. Como o CLF não deve operar devido a curtos-circuitos externos ao transformador, o valor de amperes de intersecção deve ser maior do que a corrente máxima de curto-circuito permitida pela impedância (mínima) do transformador. Este requisito é cumprido localizando o ponto de cruzamento na zona amarela 3 da Figura 1.

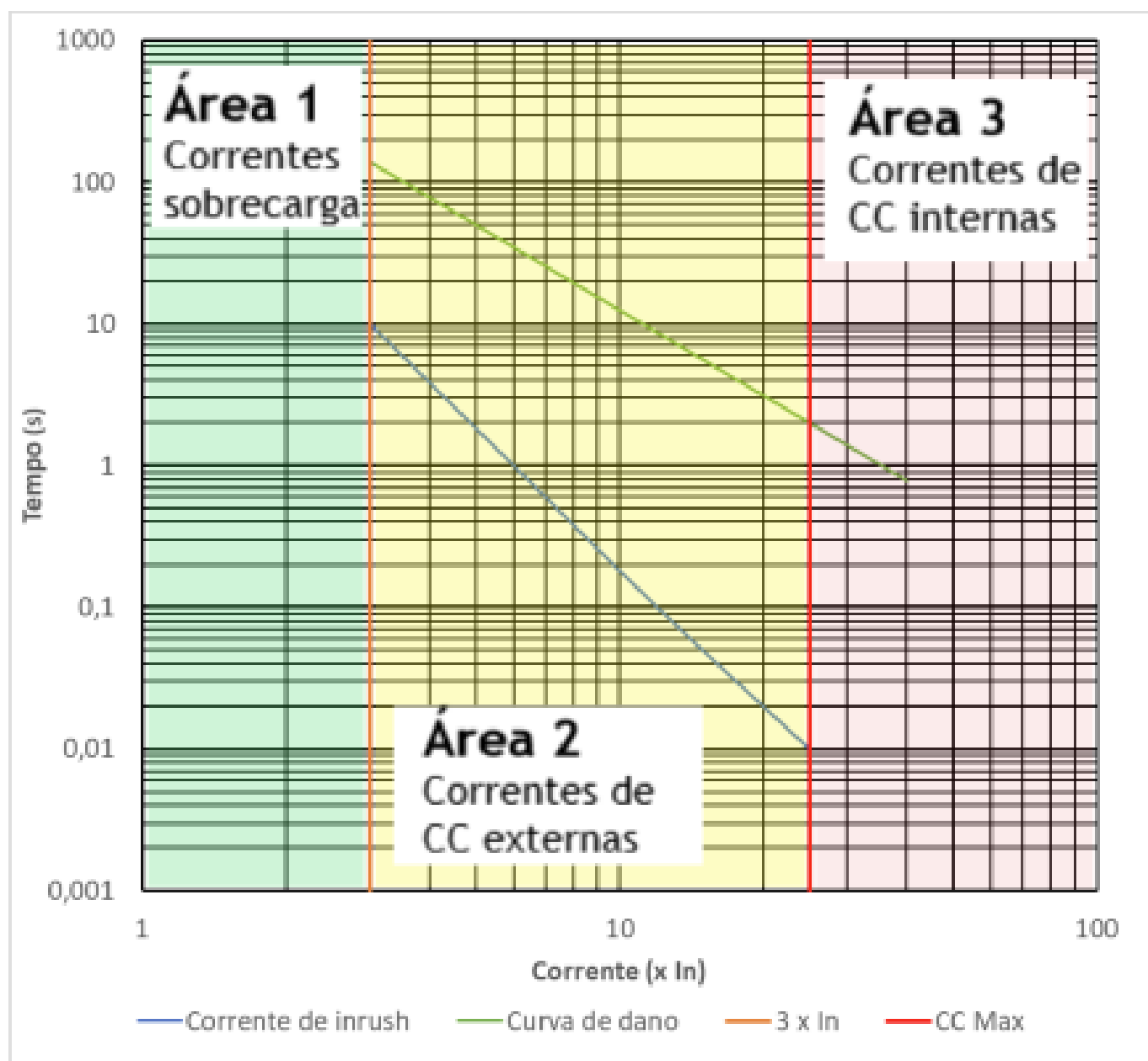


Figura 1 - Principais zonas de sobrecorrente do transformador



Figura 2 - Característica típica aceitavel da corrente de magnetização inrush

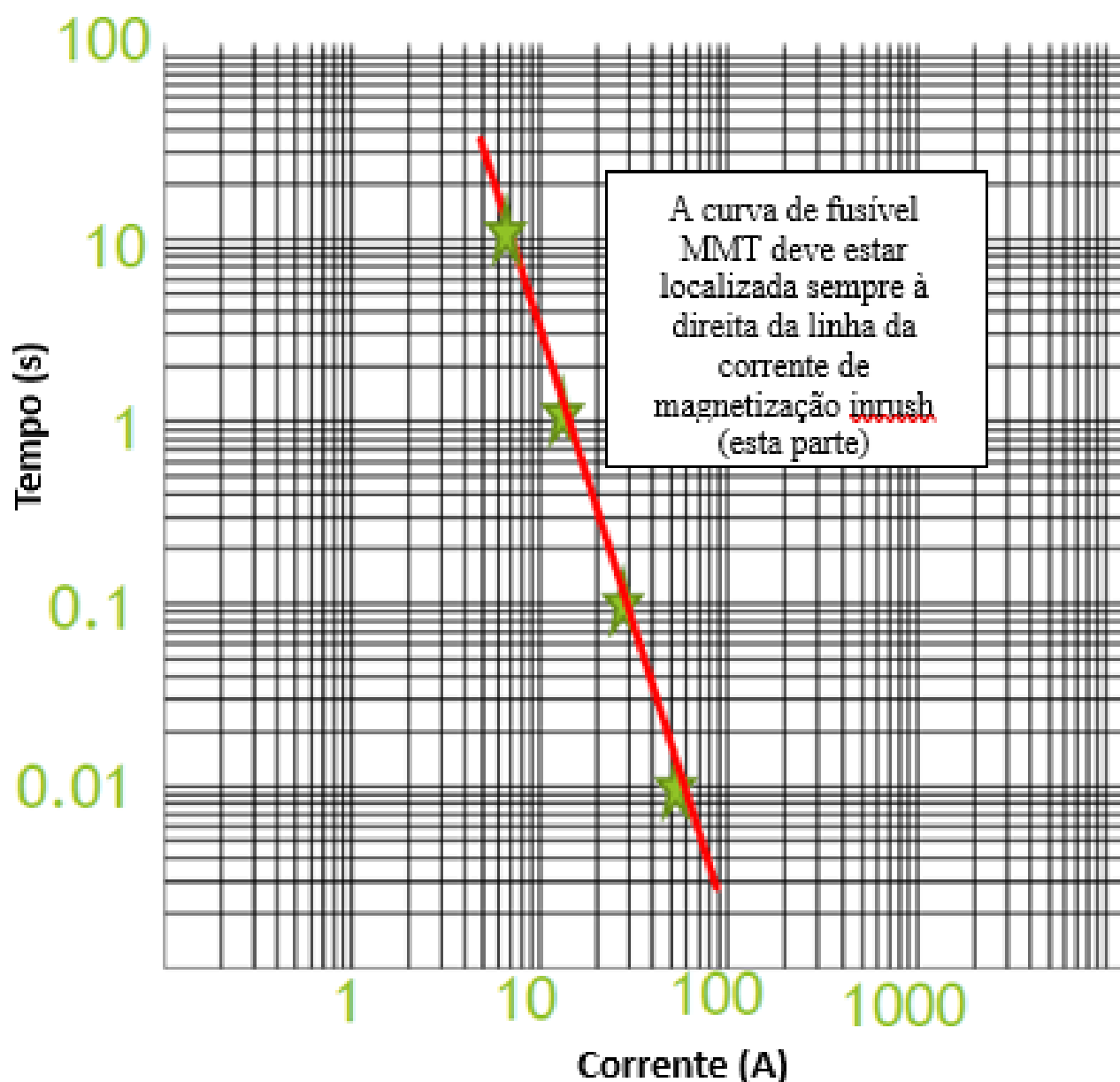


Figura 3 - Característica da corrente inrush do transformador e localização da curva de fusível MMT

d) Para evitar danos aos Elementos do CLF, as curvas dos Fusíveis Selecionados DEVEM ser separadas o suficiente para ter para $t = 1000$ segundos uma relação de correntes menor que 0,90.

2.2.2 O que causa o limite superior de KVA do transformador para proteção com fusíveis imersos em óleo atualmente disponíveis no mercado?

Como pode ser imaginado, conforme a potência do transformador cresce, cresce a corrente nominal e a capacidade de interrupção de ambos os fusíveis para serem coordenados para proteção. Isso pode ser facilmente concluído pela Figura 1. I_{cc-max} , o ponto onde a Zona 3 (amarela) começa, quando calculado em ampères, é uma função da impedância mínima do transformador ($Z_{min}\%$) e da corrente nominal (I_n):

$$I_{cc-max} (amps) = 100 / Z_{min}\% * I_n \quad (1)$$

onde I_{cc-max} é a corrente de interrupção máxima do fusível.

A regra de coordenação "c)" mencionada acima exige que o ponto de cruzamento das curvas do fusível esteja na Zona 3. Portanto, quanto maior o kVA do transformador, maior a corrente em amperes para que a Zona 3 comece e maior a corrente nominal e a capacidade de interrupção dos fusíveis para poder ter um ponto de cruzamento na Zona 3.

2.3 Determinação das características do fusível imerso em óleo isolante para alcançar a proteção de range completo de transformadores tipo pedestal de até 20MVA, classe de tensão 72.5kV.

2.3.1 Método de procedimento reverso para determinar o ponto de cruzamento necessário em amperes e Capacidades de Interrupção com base na Tabela 2 da norma IEEE Std C57.12.34™-2015:

Embora o tamanho máximo de KVA coberto por norma seja 10 MVA, está claro que ele deve ser revisado em breve para incluir, pelo menos, até 20 MVA. Por enquanto, assumiremos neste trabalho impedâncias e consequentes localizações de ponto de cruzamento para transformadores de até 20 MVA nas seguintes condições:

- Os fusíveis imersos em óleo de 34,5/38 kV atuais devem ser atualizados para a classe de 42 kV para proteger transformadores de classe de 72,5 kV, aterrados em Y. Os sistemas de 72,5 kV conectados em delta não estão dentro do escopo deste trabalho.
- O ponto de cruzamento está localizado dentro o suficiente na zona 3. Para garantir que isso aconteça, a seguinte equação é aplicada:

$$Impedância\ mínima\ do\ transformador,\ \% = 100 / (0,95\ Ponto\ de\ cruzamento) \quad In \quad (2)$$

De onde o ponto de cruzamento é determinado pela seguinte expressão:

$$Ponto\ de\ cruzamento\ mínimo,\ amperes = I_{cc-max} / 0,95 = 100 / (0,95\ Z_{min}\%) \quad In \quad (3)$$

Observe que 0,95 é o fator para garantir que o ponto de cruzamento seja dentro o suficiente na zona 3.

O ponto de cruzamento mínimo, em amperes, faz a definição das principais características de EFs e CLFs para proteger transformadores de um determinado kVA, impedância e tensão, conforme mostrado na Tabela 2. Vamos revisar esta tabela para saber as características dos fusíveis imersos em óleo que precisam ser desenvolvidos para transformadores de 8 à 20 MVA. Impedâncias para transformadores de 8 à 10 MVA são recomendadas pelo IEEE Std C57.12.34™-2015. O restante das impedâncias é considerado pelo autor como típico para esta faixa de capacidade de transformadores.

A Tabela 2 nos dá uma ideia do IC máximo dos EFs e do IC mínimo dos CLFs para proteger transformadores de até 20 MVA.

No entanto, precisamos executar casos de coordenação reais para fazer a definição dos fusíveis necessários a serem desenvolvidos para atingir este nível de proteção. Isso é feito na seção seguinte do trabalho.

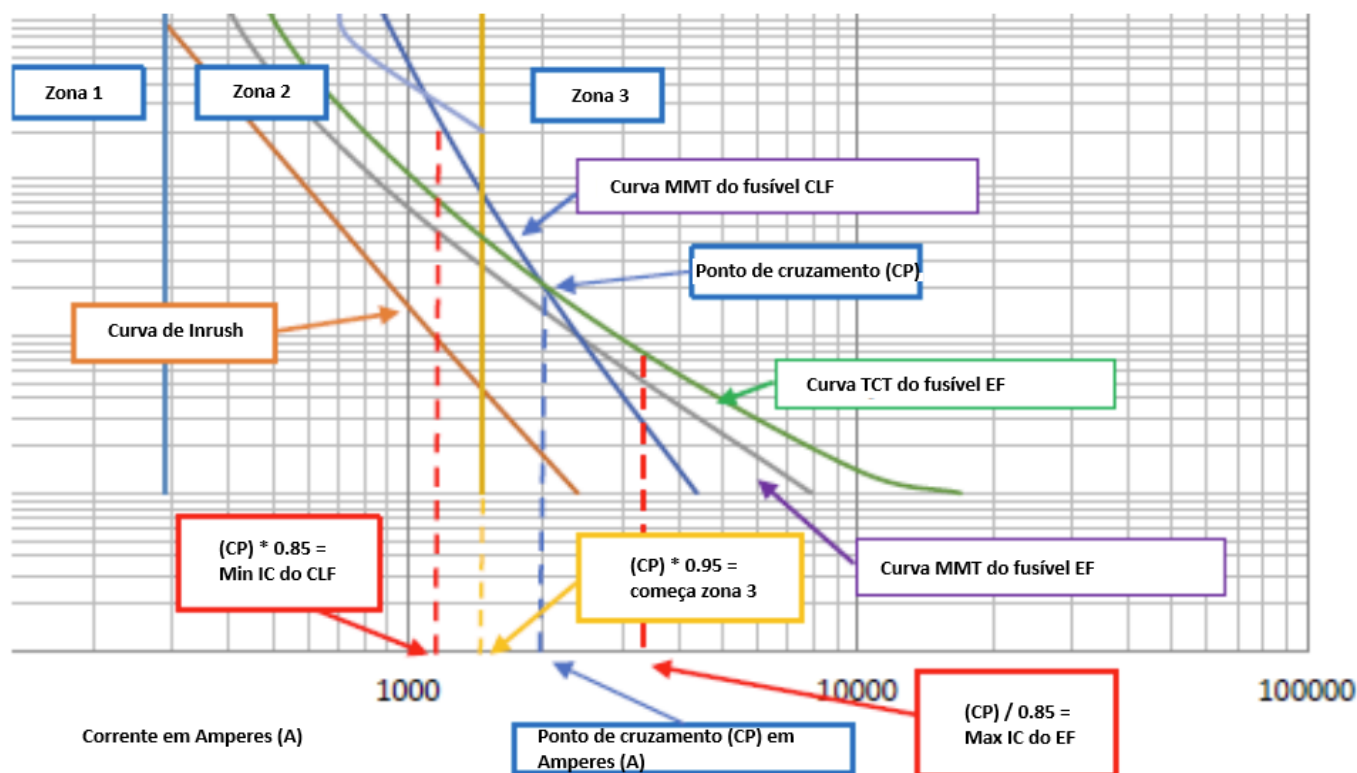
Tabela 2 - Capacidade mínima e máxima de interrupção de fusíveis imersos em óleo para proteção de transformadores até 20MVA

kVA	AT, kV	I_{HV} , (A)	Z%	I_{ccmax}	Ponto cruz. mín (*1)	# max de fusíveis paralelo	Min IC por EF Fator 0.85	Min IC por CLF
8,000	34.5	133.9	6.00	2231.3	2348.7	2	1381.6	998.2
8,000	72.5	63.7	6.00	1061.8	1117.7	1	1314.9	950.0
10,000	34.5	167.3	6.50	2574.6	2710.1	2	1594.2	1151.8
10,000	72.5	79.6	6.50	1225.1	1289.6	1	1517.2	1096.2
12,000	34.5	200.8	6.50	3089.5	3252.1	2	1913.0	1382.1
12,000	72.5	95.6	6.50	1470.2	1547.6	1	1820.7	1315.4
15,000	34.5	251.0	6.50	3861.9	4065.1	2	2391.3	1727.7
15,000	72.5	119.5	6.50	1837.7	1934.4	2	1137.9	822.1
20,000	34.5	334.7	7.00	4781.4	5033.0	2	2960.6	2139.0
20,000	72.5	159.3	7.00	2275.3	2395.0	2	1408.8	1017.9

(*1) 0.95 de fator para garantir cruzamento em zona 3

Uma vez que o ponto de cruzamento é encontrado (equação 1), o ponto de cruzamento mínimo é calculado usando a Equação 3. Então, o IC máximo do EF e o IC mínimo do CLF são localizados à direita e à esquerda do ponto de cruzamento, respectivamente, usando margens de 15%. Veja também a figura 4 para maior clareza.

Figura 4 - Determinação da capacidade mínima de interrupção do fusível CLF e capacidade máxima de interrupção do fusível EF assim que o ponto de cruzamento é calculado



2.3.2 Aproximação das características e curvas dos fusíveis a serem desenvolvidos para proteção de range completo de transformadores tipo pedestal até 20MVA utilizando curvas de fusíveis atualmente disponíveis no mercado.

O método usado neste trabalho para encontrar a corrente nominal, capacidades de interrupção e curvas dos fusíveis necessários para obter proteção de range completo de transformadores de 10 a 20 MVA consiste em:

- Executar nossa ferramenta de coordenação usando ProLinks de 34,5 kV e fusíveis limitadores de corrente de 38 kV atualmente disponíveis, em paralelo, sem limite do número de ramificações paralelas.
- Essa coordenação resulta em 2, 3, 4 ou até 6 fusíveis EF e CLF paralelos, dependendo do tamanho do kVA e da tensão nominal do transformador.
- Como nesse nível de tensão não é recomendado colocar mais de 2 fusíveis em paralelo, uma curva característica que é igual à soma de todos os fusíveis em paralelo é encontrada.
- Então dividimos essa curva característica em no máximo 2 fusíveis em paralelo e fazemos o cálculo das características e da curva dos fusíveis.
- Usando o ponto de cruzamento encontrado pela coordenação em execução, as capacidades de interrupção são encontradas para os fusíveis.

Após executar nossa ferramenta de coordenação para os mesmos tamanhos de kVA e tensões na Tabela 2, é mostrada na Tabela 3 a quantidade de fusíveis de expulsão atualmente disponíveis necessários em paralelo para proteger todos os transformadores nesta faixa.

Com base nesses resultados, na mesma tabela 3, calculamos uma classificação de amperes de fusível exclusiva que é igual à soma de todos os fusíveis em paralelo. Então, essa corrente nominal exclusiva é dividida em no máximo um ou dois fusíveis (em paralelo). Estamos nomeando esse método de encontrar novas curvas com base em múltiplos de curvas existentes como método de superposição. Esse método é usado para aproximar as classificações de arranjos em paralelo com base na classificação dos fusíveis individuais.

Tabela 3 - Seleção de fusíveis de expulsão para transformadores de 10 a 20 MVA. Fusíveis disponíveis comercialmente e corrente nominal necessária para número máximo de fusíveis em paralelo.

DADOS TRANSFORMADOR					COORDENAÇÃO USANDO FUSÍVEIS EXPULSÃO DISPONÍVEIS			CORRENTE NOMINAL P/ MAX. # DE FUSÍVEIS EM PARALELO	
kVA	HV, kV	I_{HV} (A)	Z%	I_{ccmax}	Fusíveis e # curvas comerciais	Corrente nominal fusível	Número de fusíveis	# máximo de fusíveis em paralelo permitido	Corrente nominal
10,000	34.5	167.3	6.50	2574.6	G32 - #11	98	2	2	98.0
10,000	72.5	79.6	6.50	1225.1	G32 - #11	98	1	1	98.0
12,000	34.5	200.8	6.50	3089.5	G32 - #11	98	2	2	98.0
12,000	72.5	95.6	6.50	1470.2	G32 - #11	98	1	1	98.0
12,000	72.5	95.6	6.50	1470.2	G31 - #10	68	2	2	68.0
15,000	34.5	251.0	6.50	3861.9	G32 - #11	98	3	2	147.0
15,000	72.5	119.5	6.50	1837.7	G31 - #10	68	2	2	68
20,000	34.5	334.7	7.00	4781.4	G32 - #11	98	4	2	196
20,000	72.5	159.3	7.00	2275.3	G32 - #11	98	2	2	98

A Tabela 4 mostra o mesmo procedimento aplicado aos fusíveis limitadores de corrente de 38kV disponíveis no mercado para coordenar os fusíveis de expulsão da Tabela 3.

Tabela 4 - Seleção de fusíveis limitadores de corrente para transformadores de 10 a 20 MVA. Fusíveis disponíveis comercialmente e corrente nominal necessária para número máximo de fusíveis em paralelo.

DADOS TRANSFORMADOR					COORDENAÇÃO USANDO FUSÍVEIS LIMITADORES DISPONÍVEIS			CORRENTE NOMINAL P/ MAX. # DE FUSÍVEIS EM PARALELO	
kVA	HV, kV	I_{HV} (A)	Z%	I_{ccmax}	Fusíveis e # curvas comerciais	Corrente nominal fusível	Número de fusíveis	# máximo de fusíveis em paralelo permitido	Corrente nominal
10,000	34.5	167.3	6.50	2574.6	CCF140	140	3	2	210.0
10,000	72.5	79.6	6.50	1225.1	CCF125	125	2	1	250.0
12,000	34.5	200.8	6.50	3089.5	CCF165	165	3	2	247.5
12,000	72.5	95.6	6.50	1470.2	CCF125	125	2	1	250.0
12,000	72.5	95.6	6.50	1470.2	CCF140	140	2	2	140.0
15,000	34.5	251.0	6.50	3861.9	CCF165	165	4	2	330.0
15,000	72.5	119.5	6.50	1837.7	CCF140	140	2	2	140.0
20,000	34.5	334.7	7.00	4781.4	CCF140	140	6	2	420.0
20,000	72.5	159.3	7.00	2275.3	CCF140	140	3	2	210.0

Finalmente, a Tabela 5 mostra a capacidade mínima de interrupção para fusíveis de expulsão e limitadores de corrente para atender aos critérios de “coordenação básica” IEEE C37.48, 5.2.2.6.1, afirmando que o ponto de cruzamento deve estar localizado entre o IC mínimo do CLF, localizado à esquerda do ponto de cruzamento, e o IC máximo do EF, localizado à direita do ponto de cruzamento. O fator em torno do ponto de cruzamento usado para esses cálculos de IC é 0,85. A Figura 4 explica esse fator e os critérios de coordenação em detalhes.

Tabela 5 - Fusíveis de Expulsão e Limitadores de Corrente Capacidades de Interrupção necessárias para proteger transformadores de 10 a 20 MVA usando Fusíveis Imersos em Óleo.

DADOS TRANSFORMADOR					RESUMO DAS COORDENAÇÕES DE FUSÍVEIS E CAPACIDADES DE INTERRUPÇÃO NECESSÁRIAS				
kVA	AT, kV	I_{HV} , (A)	Z%	I_{ccmax}	Ponto cruzamento (A)	Min Z%	# of Fuses in Parallel	Capacidade mínima de interrupção	
								Fusível Exp.	Fusível limitador
								Fator ponto cruzamento = 0.85	
10,000	34.5	167.3	6.50	2574.6	2797.2	6.3	2	1645.4	1188.8
10,000	72.5	79.6	6.50	1225.1	1663.4	5.04	1	1956.9	1413.9
12,000	34.5	200.8	6.50	3089.5	4301.4	4.91	2	2530.2	1828.1
12,000	72.5	95.6	6.50	1470.2	1663.4	6.05	1	1956.9	1413.9
12,000	72.5	95.6	6.50	1470.2	1939.4	5.19	2	1140.8	824.2
15,000	34.5	251.0	6.50	3861.9	5154.9	5.13	2	3032.3	2190.8
15,000	72.5	119.5	6.50	1837.7	1939.4	6.48	2	1140.8	824.2
20,000	34.5	334.7	7.00	4781.4	5594.4	6.3	2	3290.8	2377.6
20,000	72.5	159.3	7.00	2275.3	2797.2	5.99	2	1645.4	1188.8

As tabelas 3 a 5 incluem todas as características necessárias para desenvolver fusíveis para proteger transformadores de até 20 MVA usando o mesmo arranjo de proteção usado atualmente para proteção de range completo de transformadores tipo pedestal. Usar esse esquema de proteção reduzirá muito o custo de proteção de transformadores para aplicações renováveis entre 8 a 20 MVA, pois, de outra forma, são necessários aparelhagens de manobra com fusíveis usando fusíveis de energia a um custo astronômico em comparação com fusíveis imersos em óleo.

Para tirar conclusões desta tabela, é importante ter em mente as seguintes situações:

i. Atualmente, existem no mercado fusíveis de expulsão imersos em óleo de classe 34,5 kV que têm sido usados por décadas em conexão simples e paralela. Este trabalho recomenda o que fazer para aumentar sua cobertura.

ii. Correntes nominais e capacidades de interrupção de fusíveis de expulsão e limitadores de corrente precisam ser atualizadas para serem capazes de proteger a faixa de transformadores de até 20 MVA. Na verdade, os atuais fusíveis de expulsão de 34,5 kV no mercado precisam aumentar a capacidade de interrupção para cerca de 3300 amps. A Tabela 6 mostra todas as atualizações necessárias para ambos os fusíveis.

iii. Para transformadores conectados em estrela aterrados de classe 72,5 kV, a proteção de range completo de até 20 MVA pode ser alcançada apenas atualizando a classe kV dos fusíveis de expulsão de corrente de 34,5 para 42 kV sem aumento da capacidade de interrupção. Suas características estão incluídas na Tabela 3. Fusíveis de classe 72,5 kV não estão dentro do escopo deste artigo.

A Tabela 6 mostra o resumo das características dos fusíveis de classe 34,5 kV e kV mais altos que precisavam ser desenvolvidos para cobrir proteção de alcance total de até 20 MVA e transformadores tipo pedestal de 72,5 kV. Para fins de comparação, está incluída uma linha com características atuais de fusíveis disponíveis comercialmente.

Tabela 6 - Características dos fusíveis imersos em óleo a serem desenvolvidos para proteção de transformadores de 10 a 20 MVA

CARACTERÍSTICAS DOS FUSÍVEIS A DESENVOLVER						
	FUSÍVEIS EXPULSÃO			FUSÍVEIS LIMITADORES DE CORRENTE		
	CORRENTE NOMINAL	CAPACIDADE INTERRUPÇÃO (A)	kV CLASSE	CORRENTE NOMINAL	CAPACIDADE INTERRUPÇÃO (A)	kV CLASSE
NÍVEL DISPONÍVEL	100	1,800 (*1)	35	200	1,190	38
NOVO NÍVEL. MÍN-1	100 (*2)	1,645	35	210 (*2)	1,190	38
NOVO NÍVEL. MÍN-2	100 (*2)	2,530	35	250 (*2)	1,828	38
NOVO NÍVEL. MÍN-3	150 (*2)	3,032	35	330 (*2)	2,191	38
NOVO NÍVEL. MÍN-4	200 (*2)	3,291	35	420 (*2)	2,378	38
NOVO NÍVEL. MÍN-5	68 (*2)	1,141	42	140 (*2)	824	42
NOVO NÍVEL. MÍN-6	100 (*3)	1,957	42	210 (*2)	1,189	42
NOVO NÍVEL. MÍN-7	100 (*2)	1,645	42	250 (*3)	1,414	42
NOVO NÍVEL. MÍN-8	150 (*3)	3,032	42			

Para fins práticos, fusíveis de 210 A podem ser assimilados a fusíveis de 200 A. Da Tabela 6, deve-se notar que algumas das correntes e tensões nominais não correspondem às classificações preferenciais do IEEE Std C37.46-2010, numeral 3.3.

2.3.3 Determinação das curvas características dos fusíveis a serem desenvolvidos

As Figuras 5 e 6 mostram curvas de tempo-corrente MMT (Tempo Mínimo de Fusão) dos fusíveis de expulsão e limitadores de corrente a serem desenvolvidos de acordo com a Tabela 6. Para fins de comparação, as novas curvas foram desenhadas no mesmo gráfico com os fusíveis disponíveis atualmente. O procedimento para encontrar os pontos de tempo vs. corrente das novas curvas com base nas curvas existentes é o mesmo método de superposição que usamos para encontrar a corrente nominal para o número máximo de fusíveis paralelos nas Tabelas 3 e 4. As novas curvas são nomeadas de acordo com a corrente nominal em ampères.

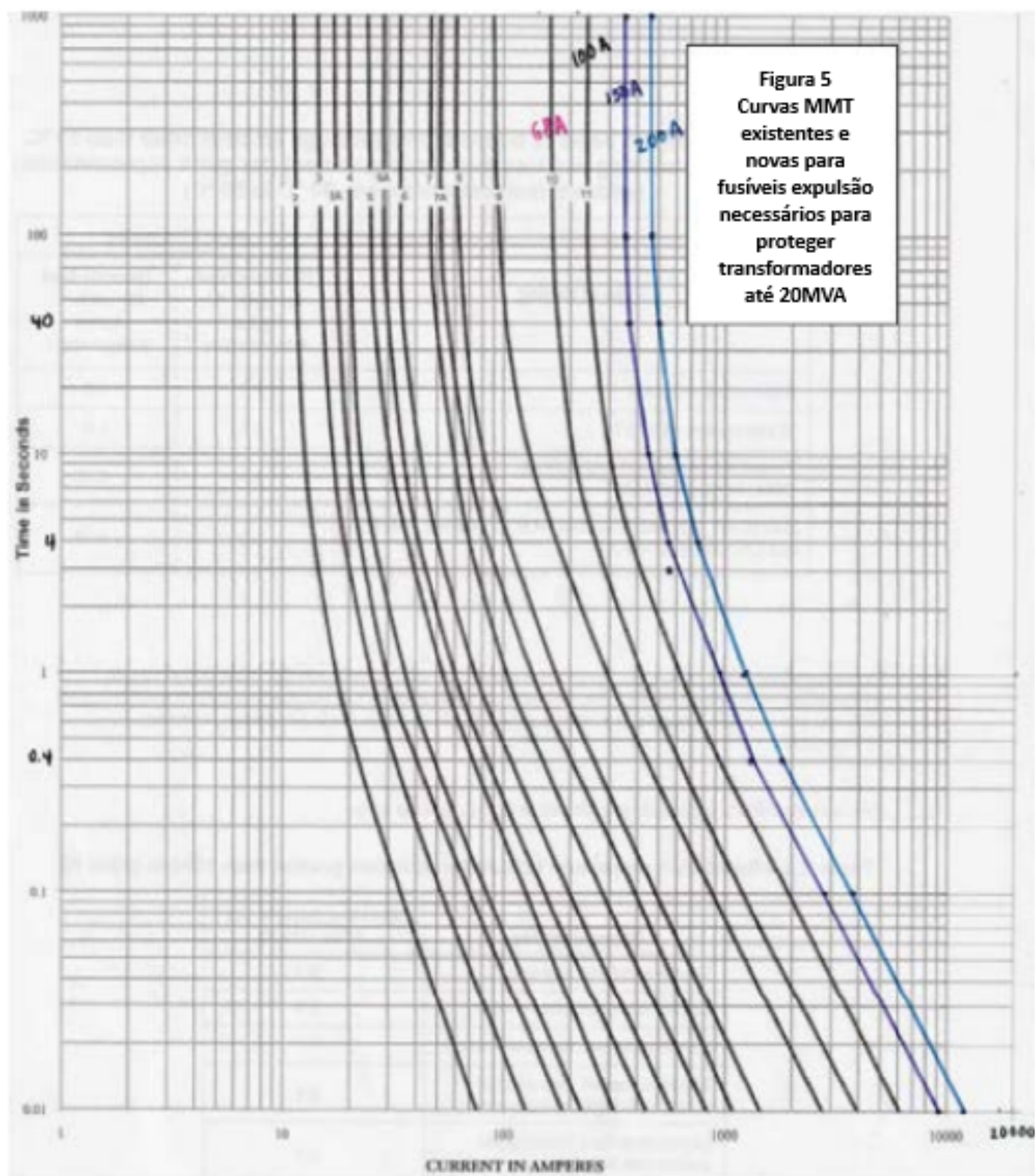


Figura 5

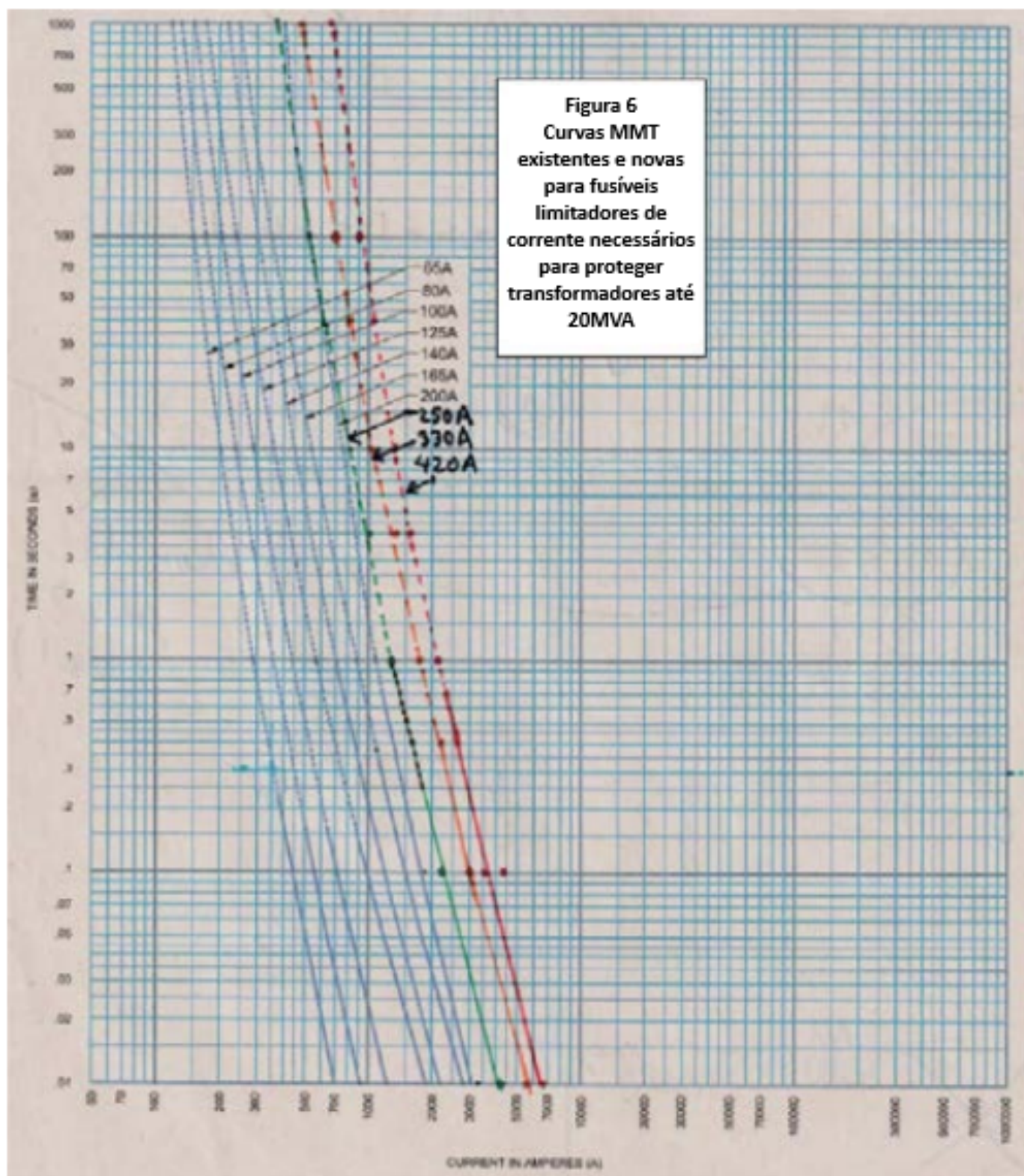


Figura 6

As tabelas 7 e 8 mostram os pontos de dados para a curva de fusão mínima em ampères. Também são mostrados os pontos de dados da curva existente em que baseamos a construção das novas curvas usando o método de superposição.

Tabela 7 - Pontos de dados de tempo vs. corrente para os novos fusíveis de expulsão com base nos fusíveis existentes.

TEMPO	#11 - 100A CORRENTE	150A CORRENTE	200A CORRENTE
0.01	6,120	9,180	12,240
0.1	1,935	2,903	3,870
0.4	945	1,418	1,890
1	640	960	1,280
4	378	567	756
10	302	453	604
40	252	378	504
100	239	359	478
1000	239	359	478
BASE CURVA EXISTENTE			

Tabela 8 - Pontos de dados de tempo vs. corrente para os novos fusíveis limitadores de corrente com base nos fusíveis existentes.

TEMPO	165A CORRENTE	250A CORRENTE	330A CORRENTE	140A CORRENTE	420A CORRENTE
0.01	2,822	4,233	5,644	2,200	6,600
0.1	1,500	2,250	3,000	1,200	3,600
0.4	1,100	1,650	2,200	860	2,580
1	880	1,320	1,760	700	2,100
4	670	1,005	1,340	530	1,590
10	540	810	1,080	450	1,350
40	410	615	820	350	1,050
100	350	525	700	300	900
1000	248	372	496	220	660
BASE CURVA EXISTENTE			BASE CURVA EXISTENTE		

2.4 Outras considerações

Características I2t: Neste nível de tamanhos de transformadores, a energia permitida a passar pelo fusível para o circuito protegido sob condição de falha é muito maior. Método de superposição semelhante pode ser usado para determinar o I2t de fusão mínima dos fusíveis e o I2t de limpeza máxima. Tensões de arco mais altas produzem maior nível de energia no instante da falha. Testes seriam necessários para garantir que os fusíveis lidem com níveis de energia.

Tensões de arco: tensões de arco maiores precisam ser tratadas devido à atualização de fusíveis de expulsão de 35 kV e os fusíveis limitadores de corrente de 38 kV para 42 kV. Além disso, devido aos tamanhos maiores de kVA, há maiores relações X/R.

3. Conclusão

O método de superposição foi usado para desenvolver novos fusíveis para atingir proteção de range completo de transformadores de até 20 MVA, 72,5kV em estrela aterrado ou até 42 kV delta conectados usando fusíveis imersos em óleo.

O sistema de proteção desenvolvido ajuda a reduzir os custos de proteção em comparação com relés diferenciais típicos ou dispositivos de manobra dotados de fusíveis de potência.

Testes precisam ser conduzidos para verificar as características necessárias dos novos fusíveis e seu desempenho durante a operação paralela.

4. Referências bibliográficas

Catálogo ABB. Protective Link Expulsion Fuse Type Prolink, Oil Immersed - Technical Guide 15 kV, 23 kV, & 35 kV. 2003

ABB Protective Links - Technical and installation guide. 2011

Cooper Power Systems - 38 kV Bay-O-Net fuse link. 2015

Cooper Power Systems - Current Sensing Bay-O-Net Fuse Link and High Ampere Overload. 2008.

Cooper Power Systems - ELSP current-limiting backup fuse. 2015

ERMCO Components Inc. Bayonet Expulsion Fuse Link. 2006

ERMCO Components Inc. Complete Updated Catalog of Terminal Board Types - Drawings and PNs

IEEE Std. C37.46 -2010 Standard for HV Expulsion and CL Type Power Class Fuses and Fuse Switches

IEEE Std. C37.48-2020 IEEE Guide and Tutorial for the Application of High-Voltage (1000 V) Fuses and Accessories

HI-TECH – Catálogo de produtos de fusíveis. 2018.

MERSEN MMT Curve - 38kV CLF - 720887 9F59CCF065-9F59CCF165, 9F59CDF200 - 38.0kV MM Curve. 2015

MERSEN - Oil Submersible protector (OSP) Sure Guard data sheet 8.3kV – 15.5kV – 23kV – 38kV. 2012

Protection's coordination in distribution transformers. Um curso da The H-J Family of Companies. 2019