

Correntes Inrush em Transformadores da Distribuição a Seco na Celesc Distribuição

Eliézer Abreu Paegle, Engenheiro da Divisão de Estudos e Normas, DPEP/DVEN, Celesc Distribuição

Síntese — Apesar do notável acervo técnico disponibilizado, parece perdurar ainda entre os profissionais algumas dúvidas sobre o fenômeno. Agregamos aqui documentos abertos ao público, todos eles disponíveis na internet, e, quiçá, contribuir para melhor entendimento da questão.

I. OBJETIVO

O objetivo final deste estudo é verificar se os elos fusíveis normatizados para os transformadores de distribuição a seco da Celesc Distribuição estão dimensionados corretamente frente à correntes inrush.

II. O QUE É O FATOR κ DE CORRENTE INRUSH?

É o fator que indica quantas vezes a corrente inrush é maior que a corrente nominal do transformador. Exemplo: $I_{inrush} = 10 \times I_N$

Lembrete: as unidades apresentadas para a I_{inrush} e a I_N costumam ser diferentes. Enquanto a I_{inrush} é em valor instantâneo máximo (que acontece no 1º pico de corrente), expresso em (Apico), a corrente nominal I_N é sempre dada em valor eficaz (Aeficaz).

III. VALIDAÇÃO DOS ELOS FUSÍVEIS DA CELESC D QUANTO AO INRUSH

A avaliação considera os picos de corrente inrush que se sucedem nos primeiros 0,10 segundos (6 ciclos). A curva da corrente magnetizante é convertida para valor eficaz, possibilitando assim a aplicação nas curvas do elo fusível. Já para estudos de proteção, envolvendo relés, é necessário analisar toda a forma de onda de corrente, para ajustes dos elementos instantâneos, retardo de tempo e proteção diferencial.

Conclusão: o estudo aponta que os elos fusíveis utilizados atualmente pela Celesc D suportam, com folga, as correntes inrush dos transformadores de distribuição a seco..

Seguem-se os resultados:

Adequação do Elo vigente em fev/2017 na Celesc D à Corrente Inrush - I -							
Transformadores de Distribuição a Seco - 13.800V/380/220V - Dyn1 -							
Transformador de Distribuição			I inrush	Teste para $t=0,10$ seg			Corrente de fusão do elo
Potência	Corrente	Elo fusível	Pico máx. (1º ciclo)	I inrush valor eficaz (0,10 s)	Corrente mín. fusão elo 0,10s	Validação do elo	Curva 0,10s
P_N	I_N	Adotado pela Celesc D	I_{inrush}/I_N	I_{inrush}/I_N	I_{min}/I_N	Inrush eficaz < 0,10s min?	I_{min}
(kVA)	(Aeficaz)		(Apico/Aeficaz)	(Aeficaz/Aeficaz)	(Aeficaz/Aeficaz)	Resultado	(Aeficaz)
75	3,1A	3 H	12,0	4,6	28	OK	89
112,5	4,7A	5 H	11,5	4,6	19	OK	89
150	6,3A	6 K	11,0	4,5	11	OK	72
225	9,4A	8 K	11,0	4,8	10	OK	97
300	12,6A	10 K	10,0	4,5	10	OK	128
500	20,9A	15 K	10,0	4,7	10	OK	215
750	31,4A	25 K	10,0	4,8	11	OK	350
1000	41,8A	30 K	10,0	4,8	11	OK	447
1250	52,3A	- -	10,0	4,8	-	-	-
1500	62,8A	50 K	9,0	4,5	11	OK	719
2000	83,7A	- -	9,0	4,5	-	-	-
2500	104,6A	- -	9,0	4,6	-	-	-
3000	125,5A	- -	8,0	4,2	-	-	-

Adequacidade do Elo vigente em fev/2017 na Celesc D à Corrente Inrush - II -							
Transformadores de Distribuição a Seco - 23.100V/380/220V - Dyn1 -							
Transformador de Distribuição			I inrush	Teste para t=0,10 seg			Corrente de fusão do elo
Potência	Corrente	Elo fusível	Pico máx. (1º ciclo)	I inrush valor eficaz (0,10 s)	Corrente mín. fusão elo 0,10s	Validação do elo	Curva 0,10s
P _N	I _N	Adotado pela Celesc D	I _{inrush} /I _N	I _{inrush} /I _N	I _{min} /I _N	Inrush eficaz < 0,10s min ?	I _{min}
(kVA)	(A _{eficaz})		(A _{pik} /A _{eficaz})	(A _{eficaz} /A _{eficaz})	(A _{eficaz} /A _{eficaz})	Resultado	(A _{eficaz})
75	1,9 A	2 H	13,0	5,3	47,5	OK	89
112,5	2,8 A	3 H	12,0	4,9	31,7	OK	89
150	3,7 A	5 H	12,0	4,9	23,7	OK	89
225	5,6 A	6 K	12,0	5,1	12,8	OK	72
300	7,5 A	6 K	11,0	4,8	9,6	OK	72
500	12,5 A	10 K	11,0	5,0	10,2	OK	128
750	18,7 A	15 K	10,0	4,7	11,5	OK	215
1000	25,0 A	20 K	10,0	4,8	10,9	OK	273
1250	31,2 A	-	10,0	4,9	-	-	-
1500	37,5 A	30 K	10,0	5,0	11,9	OK	447
2000	50,0 A	40 K	8,0	4,1	11,3	OK	565
2500	62,5 A	50 K	8,0	4,1	11,5	OK	719

Caso se deseje um valor padronizado para aplicação em qualquer transformador pode-se adotar o pior caso na pior hipótese, com corrente inrush eficaz igual a $5,3xI_N$. Este resultado portanto já leva em consideração a hipótese improvável de coincidirem todos os elementos que culminem para a corrente máxima inrush (valor instantâneo de $13,0xI_N$).

Resultado Final - III -	
Transformador de Distribuição a Seco	I inrush
Potência	Valor eficaz (0,10 s)
P _N	I inrush/I _N
(kVA)	(A _{eficaz} /A _{eficaz})
75 a 3000	5,3

IV. A QUESTÃO DA CORRENTE EFICAZ

Energizar um transformador trifásico sem que ocorra corrente inrush é uma possibilidade remota. Ou seja, o inrush é uma certeza de quase 100%. Por outro lado, que a inrush atinja o seu valor máximo também é um evento de muito baixa probabilidade, já que exigiria uma combinação de coincidências tipo aleatórias.

De qualquer forma, nos transformadores de distribuição a sua amortização é muito rápida. Por exemplo, na potência de 150 kVA em 6 ciclos a corrente fica reduzida à metade.

Cada energização do transformador ocorre com uma corrente inrush diferente.

A obtenção da corrente inrush máxima pode ser obtida por:

1º medição através de ensaios específicos; ou

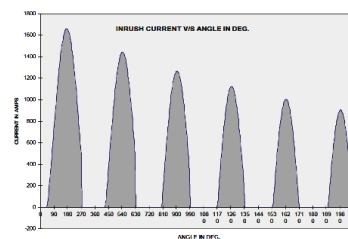
2º cálculo teórico, a partir das características de cada transformador (que só o fabricante conhece a fundo).

Por medição, a obtenção da corrente máxima se dá com a realização de bateria de testes em laboratório, controlando de forma sistemática os ângulos de desligamento e religamento da onda de tensão.

“Uma valiosa maneira de obter uma compreensão mais profunda dos fenômenos de corrente de inrush é através de extensas medições em laboratório sobre transformadores de distribuição e medições de campo em transformadores de potência. Os dados experimentais são altamente benéficos na verificação do modelo desenvolvido”. (Tradução livre) Nicola Chiesa, em *Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation*, 2010

Medições feitas em campo impreterivelmente registram corrente inrush muito inferior a do valor máximo.

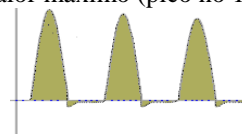
Para o fenômeno inrush o que se mostra mais relevante é seu valor eficaz, que está relacionado com a área integralizada debaixo da onda da corrente inrush.



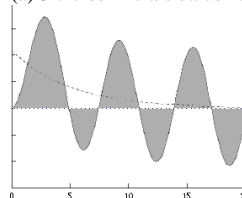
A energia passante no elo é uma média quadrática da I^2 em todos os pontos durante o tempo que se deseja avaliar. As curvas de elos fusíveis da Norma NBR 5456 e NBR 5458 são definidas em Amperes eficazes x Tempo. Então, é um equívoco aplicar o valor máximo instantâneo da corrente inrush na curva do elo fusível.

o de uma onda senoidal convencional, e também menor que a do curto circuito

Para simples ilustração, os gráficos abaixo mostram as áreas integralizadas nos 3 primeiros ciclos de uma corrente inrush e de uma corrente de curto circuito, ambas possuindo o mesmo valor máximo (pico no 1º ciclo):



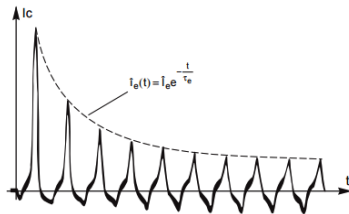
(a) 3 ciclos iniciais da corrente inrush



(b) 3 ciclos iniciais de falta interna de um transformador

V. QUAL É O VALOR EFICAZ DA CORRENTE INRUSH?

A cada ciclo a onda da corrente inrush vai mudando de forma, afetando por conseguinte o seu valor eficaz



O valor eficaz/ciclo da corrente inrush obrigatoriamente é maior que $0,35 \times I_{pico}$ e menor que $0,71 \times I_{pico}$. A média entre esses dois valores extremos seria $=0,53 \times I_{pico}$.

Justificativa: onda senoidal completa tem valor eficaz $=0,71 = 1/\sqrt{2}$; e cortada em todo um semiciclo valor eficaz $=0,35 = 1/\sqrt{2} \times (1/2)$.

O Dr. Philip J. Hopkinson (membro do IEEE), obteve um valor médio para o 1º ciclo de $I_{eficaz} = 0,563 \times I_{pico}$. Este é o fator que adotamos para obtenção do valor eficaz, para aplicação aos picos de corrente durante os 6 primeiros ciclos ($t=0,10s$). Este valor já é conservadoramente alto para o tempo de 0,10 segundos, conforme se mostra:

A) PHILIP J. HOPKINSON

Philip J. Hopkinson, da IEEE, estudou o inrush para transformadores de média e baixa tensão, passíveis de aplicação nas coordenação de proteção de fusíveis/relés:

Os transformadores de distribuição a seco, com primário em delta, classe 15 kV, tiverem o seguinte valor eficaz, em média:

- No 1º meio-ciclo $=0,707 \times I_{pico}$
- No 1º ciclo $=0,563 \times I_{pico}$
- Em 6 ciclos (0,10s) $=0,384 \times I_{pico}$

(I_{pico} é o valor no pico inicial).

B) CHARLES MULERTT

Charles Mulertt utiliza $I_{eficaz} = 0,625 \times I_{pico}$ (que é a mesma coisa que $I_{pico} / 1,6$) para $t=0,01s$ (1º ciclo).

"The RMS value of the inrush current at 10 ms is:

$$I_{INRUSH} = \frac{I_{PEAK}}{1.6}$$

GB107- IEC 60282 - European Medium Voltage Fuses"

C) CHRISTOPHE PRÉVÉ

Christophe Prévé sugere $I_{eficaz} = 0,707 \times I_{pico}$ para o 1º ciclo.

$$\frac{\hat{I}_{rush}(t)}{\sqrt{2}}$$

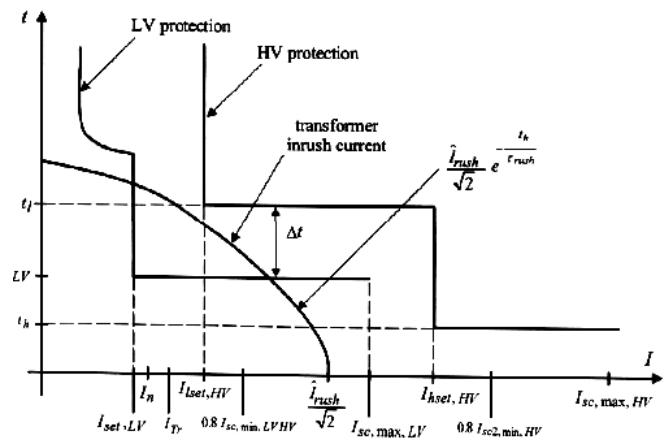
\hat{I}_{rush} : maximum peak value, i.e. the first peak

Propõe no estudo seletividade da proteção, desenhar a curva da corrente inrush eficaz calculada pela fórmula acima aplicada para cada ciclo:

$$\hat{I}_{rush} I e^{-\frac{t_h}{\tau_{rush}}}$$

value of the peak inrush current of the transformer at $t = t_h$

t_h : HV protection high threshold time delay



(Livro: Protection of Electrical Networks- Editora ISTE-2006)

D) Fabricante SCHNEIDER

A SCHNEIDER propõe usar $I_{eficaz} = 0,35 \times I_{pico}$.

The rms value of the transient state current is calculated using the following equation:

$$I_{rms}^2 = 0.125 I_C^2 \frac{\tau_a}{t} (1 - e^{-\frac{2t}{\tau_a}})$$

(Cahier technique no. 128 _ Design and use of MV current-limiting fuses_ 3.2 Protecting transformers_2003_Pg.14)

VI. QUAIS OS VALORES PROPOSTOS PARA I_{INRUSH} (NORMAS; CONCESSIONÁRIAS; AUTORES; FABRICANTES) ?

A corrente inrush depende de vários fatores, e do tipo e projeto do transformador.

1) REFERÊNCIAS DA LITERATURA

- 2 a 5 vezes I_N para transformadores de potência,
- 10 a 15 vezes I_N para transformadores de distribuição,
- 20 a 25 vezes I_N , para transformadores de pequeno porte (< que 50 kVA),
- até 60 vezes I_N em transformadores toroidais (os quais utilizam uma massa menor de cobre em sua fabricação)

2) IEEE

- 8 a 12 vezes I_N , para transformadores, $t=0,10s$ (Norma ANSI/IEEE Std 242-1986 -Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems)

A norma aborda a corrente inrush em 3 oportunidades:

Norma ANSI/IEEE Std 242-1986		Corrente Inrush Eficaz	
		Inrush /I _N	
item da Norma	aplicado a:	t=0,01s	t=0,10s
5.11.5 Transformer Protection	Transformador de BT (LV)	(A _{eficaz} /A _{eficaz})	(A _{eficaz} /A _{eficaz})
5.17.2 Current Rating	Seleção de fusível	≈ 20-25	≈ 12
10.8.3.3 Fuses	Proteção de transformador	25	8-12
		-	8-12

A IEEE (Norma ANSI/IEEE Std 242-1986 -Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems) não menciona claramente se a corrente inrush proposta é em valor de pico ou em valor eficaz. Entretanto, com base nos termos utilizados “*tem correntes inrush equivalentes correntes de partida equivalentes a cerca de 12 vezes a carga total, com duração de 0,1 s, também cerca de 20 a 25 vezes, o valor de 0,01 s*” (5.11.5 Transformer Protection); e “*o efeito de aquecimento integrado, visto por um fusível num tal circuito*” (5.17.2 Current Rating); e “*correntes de inrush de 8 ou 12 vezes a corrente normal de plena carga para 0,1 s são comumente usados para fins de coordenação*” (10.8.3.3 Fuses), fica entendido que a recomendação proposta corresponde ao valor eficaz da corrente inrush.

3) IEC

- 10 a 12 vezes I_N, para transformadores, t=0,10s (Norma IEC TR 60787)

4) CONCESSIONÁRIAS BRASILEIRAS

CPFL Energia

- 10 vezes I_N para transformadores a óleo até 1000 kVA, para t=0,10s (Norma Técnica GED-16628)
- 8 vezes I_N para transformadores a óleo > 1000 kVA, para t=0,10s (Norma Técnica GED-16628)
- 14 vezes I_N para transformadores a seco qq potência, para t=0,10s (Norma Técnica GED-16628)
- 12 vezes I_N para transformador único
- variando de 8,3 vezes I_N para 2 transformadores energizados pelo mesmo dispositivo, até 6,0 vezes I_N para mais que 10 transformadores

COPEL

- 12 vezes I_N, t=0,10s para transformador de pedestal (NTC 810082)
- 25 vezes I_N, t=0,01s para transformador de pedestal (NTC 810082)
- 8 vezes I_N, para transformador único (Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade de Entrada de Serviço)
- 8 vezes I_N para o maior transformador + 4 vezes I_N para os demais (Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade de Entrada de Serviço)

AES ELETROPAULO

- 8 a 12 vezes I_N, para transformadores de distribuição, t=0,10s (Norma Técnica GED-16628)
- 12 vezes I_N para transformador único
- variando de 8,3 vezes I_N para 2 transformadores energizados pelo mesmo dispositivo, até 6,0 vezes I_N para mais que 10 transformadores; t=0,13s (Norma Técnica GED-16628)
- 12 vezes I_N, para transformador de pedestal, t=0,10s (Fascículo Rede De Distribuição Subterrânea - Condomínios Particulares - Livro De Instruções Gerais)
- 15 vezes I_N, para transformador submersível, rede subterrânea, t=0,10s (Docplayer De Rafael Moreno E Charles Rodrigues)
- 25 vezes I_N, para transformador submersível, rede subterrânea, t=0,01s (Docplayer de Rafael Moreno e Charles Rodrigues)

CEMIG

- 8 vezes I_N para transformadores a óleo ou epóxi, até 2000 kVA, para t=0,10s (Norma Técnica ND-5.3)
- maior que 2000 kVA, consultar fabricante (Norma Técnica ND-5.3)
- k vezes I_N do maior transformador + soma das I_N dos demais transformadores (Norma Técnica ND-5.3)

ENERGISA

- 8 a 12 vezes I_N para transformadores de potência até 2.000 kVA, t=0,10s

5) CLÁUDIO SÉRGIO MARDEGAN

- 10 vezes I_N para transformadores a óleo até 1 MVA, abaixador, delta no primário, para t=0,10s
- 8 vezes I_N para transformadores a óleo > 1 MVA, abaixador, delta no primário, para t=0,10s
- 14 vezes I_N para transformadores a seco, qq potência, abaixador, delta no primário, para t=0,10s (Revista O Setor Elétrico, Setembro 2010, Proteção dos transformadores, Parte 1)

6) JAMES H. HARLOW

- 25 vezes I_N, para transformadores, t=0,01s
- 12 vezes I_N, para transformadores, t=0,10s (Livro Electric Power Transformer Engineering)

7) SHEEBA KHAN

- 25 vezes I_N, para transformadores, t=0,01s
- 12 vezes I_N, para transformadores, t=0,10s (Livro Industrial Power Systems)

8) ARTHUR WRIGHT and P. G. NEWBERY

- 10 ou 12 vezes I_N, para transformadores, t=0,10s (Livro Electric Fuses Institution of Engineering and Technology – London-2008)

9) STANLEY H. HOROWITZ e ARUN G. PHADKE

- 8 a 10 vezes I_N, valor instantâneo de pico (Livro Power System Relaying, 2014, pg 210)

10) ZELJKO SPOLJARIC, VEDRANA JERKOVIC E MARINKO STOJKOV

S_n [MVA]	0.5	1	5	10	50
$I_{u\max} / I_n$	15	14	10	10	9
$\tau_{50\%}$ [s]	0.16	0.2	1.2	5	72

Tab. 1 Values and duration time of inrush current

I_N é em valor instantâneo de pico e T significa sua constante de tempo.

(Paper Measurement System for Transformer Inrush Current Higher Harmonic Determination)

11) PHILIP J. HOPKINSON

Corrente inrush de acordo com o tipo e tecnologia do transformador.

Inrush Currents For Medium Voltage Transformers			
By Philip J. Hopkinson and Jayant Patwardhan - IEEE -			
Critical Values for Fuse/Relay Coordination			
High Voltage Delta Connected Winding			
Potência	Transformer Type	Elevação de Temperatura (°C)	RMS Equivalent Currents (xN) a 20°C, t=0.10s
< 750	Power Cast	80	10,3
< 750	Uni-Cast	100	10,5
< 750	Pwr Dry 15kV	80	9
< 750	Pwr Dry 15kV	150	7,7
< 750	Pwr Dry	150	7,2
<750	Pwr Dry 5KV	150	6,2
>1000	Power Cast	80	9,6
>1000	Uni-Cast	100	9,2
>1000	Pwr Dry 5KV	150	7,9
>1000	Pwr Dry 15KV	80	8,7
>1000	Pwr Dry 15kV	150	7
>1000	Pwr Dry	150	7,1
< 750	Liquid-Filled	65	9
>1000	Liquid-Filled	65	6,9
	34.5kV-200kV		11,1
	High BIL-CU-low winding		7,7

(Philip J. Hopkinson, IEEE, Transformers Committee-Meeting Minutes-November 11, 1998-Inrush Currents For Medium Voltage Transformers)

12) CHRISTOPHE PRÉVÉ

Corrente Inrush, valor de pico

- transformadores MV/LV a óleo, energizados a vazio pela MV, França

Power in kVA	100	160	250	315	400	500	630	800	1,000	1,250	1,600	2,000	2,500	3,150
$n_{rush} = \frac{\hat{I}_{rush}}{I_n}$	14	12	12	12	12	12	11	10	10	9	9	8	8	8
τ_{rush} in seconds	0.15	0.20	0.22	0.24	0.25	0.27	0.30	0.30	0.35	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55

- transformadores MV/LV isolados a seco, energizados a vazio pela MV, França

Power in kVA	160	250	400	630	800	1,000	1,250	1,600	2,000
$n_{rush} = \frac{\hat{I}_{rush}}{I_n}$	10.5	10.5	10	10	10	10	10	10	9.5
τ_{rush} in seconds	0.13	0.18	0.25	0.26	0.30	0.30	0.35	0.40	0.40

couplage	Yzn 11 (version 50 kVA uniquement) Dyn 11
----------	--

I_N é em valor instantâneo de pico e T significa sua constante de tempo.

(Livro: Protection of Electrical Networks- Editora ISTE-2006)

13) FRANCESCO MUZI

Referências para transformadores a seco:

Transformer rated power [kVA]	k_i	Time constant τ [s]
250	12	0.22
400	12	0.25
630	11	0.30
1250	10	0.35
1600	9	0.40
2000	8	0.45

k_i = valor de pico da corrente inrush em vezes I_N

(The transformer inrush currents in large MV-cable installations- University of L'Aquila- Italy)

14) Fabricante TAMURA INDUSUL (Transformadores a seco)

- 12 vezes I_N para 75 kVA, valor instantâneo de pico
- 10 vezes I_N para 1000 kVA, valor instantâneo de pico
- 8 vezes I_N para 3000 kVA, valor instantâneo de pico (Catálogo RESIDRY, Primário 13,8 kV, Secundário 380/220V, Dyn1)

15) Fabricante WEG (Transformadores a seco)

- 9,4 vezes I_N para 1000 kVA, valor instantâneo de pico (Folha de Dados, Primário 13,8 kV, Secundário 380/220V, Dyn1)

16) Fabricante **UNIÃO TRANSFORMADORES**
(Transformadores a seco)

- 14 vezes I_N para 150 kVA, valor instantâneo de pico
- 11 vezes I_N para 1000 kVA, valor instantâneo de pico
(Catálogo, DRY TECH, Primário 13,8 kV, Dyn1)

17) Fabricante **SCHNEIDER ELECTRIC** (Transformadores a seco)

- 10,5 vezes I_N para 160 kVA, valor instantâneo de pico
- 10 vezes I_N para 1000 kVA, valor instantâneo de pico
(Catálogo TRIHAL SCHNEIDER 50 Hz, fabricação europeia, 10 ou 10/22,9 kV, Dyn11)

18) Fabricante **SCHNEIDER-ELECTRIC**

P (KVA)	ne $= \frac{I_{\text{encl. crête}}}{I_n \text{ transformateur}}$	Constante de temps (s)
50	15	0,1
100	14	0,15
160	12	0,2
250	12	0,22
400	12	0,25
630	11	0,3
800	10	0,3
1000	10	0,35
1250	9	0,35
1600	9	0,4
2000	8	0,45

I_N é em valor instantâneo de pico e T significa sua constante de tempo.
(Cahier technique n° 141-Les perturbations électriques en BT)

19) Fabricante **ABB**

- transformador a óleo

S_{nTR} [kVA]	$k_i = \frac{i_{p_{inrush}}}{I_{nTR}}$	τ_{inrush} [s]
50	15	0.10
100	14	0.15
160	12	0.20
250	12	0.22
400	12	0.25
630	11	0.30
1000	10	0.35
1600	9	0.40
2000	8	0.45

- transformador a seco

S_{nTR} [kVA]	$k_i = \frac{i_{p_{inrush}}}{I_{nTR}}$	τ_{inrush} [s]
200	10,5	0.15
250	10,5	0.18
315	10	0.2
400-500	10	0.25
630	10	0.26
800-1000	10	0.3
1250	10	0.35
1600	10	0.4
2000	9,5	0.4

k_i é em valor instantâneo de pico e T significa sua constante de tempo.

(MV_LV Transformer Substations_Theory and Examples Of Short-Circuit - Calculation Technical Application Papers_2008_Pg.30)

20) **MICROENER**

caractéristiques électriques							
puissance assignée (kVA)	50 100 160 250 315 400 500						
tension assignée	primaire	15 et/ou 20 kV					
	secondaire à vide	410 V entre phases, 237 entre phases et neutre					
couplage		Yzn 11 (version 50 kVA uniquement) Dyn 11					
courant d'enclenchement	le/ln valeur crête	10	9	9	8	8	8
	constante de temps	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

I_N é em valor instantâneo de pico e T significa sua constante de tempo.

(Les Cahiers Techniques de MICROENER- Protection Des Transformateurs)

VII. COMPARATIVO DE CORRENTES INRUSH PARA TRANSFORMADORES A SECO DE BAIXA POTÊNCIA

O quadro seguinte permite comparar, dentre as várias referências, as correntes inrush instantâneas em transformadores a seco de baixa potência:

Transformadores de Distribuição - Corrente Inrush, valor eficaz, t=0,10s								
Comparação entre Normas, Concessionárias e Fabricantes								
a Seco - BAIXA POTÊNCIA (≈ 150 kVA)								
Fonte de Referência	Potência kVA	Modelo	Tipo	Tensão kV	Grupo Ligação Primário	Elevação de Temperatura (°C)	In-rush /IN (valor eficaz)	Referência
Grupo 1: Os que consideram que a inrush é muito elevada:								
CPFL Energia			seco	qq	delta	qq	14	(1)
Cláudio Mardegan	qq		seco	qq	delta	qq	14	(2)
CEMIG	<2000		a óleo	qq	delta	qq	10,5	(3)
Philip J. Hopkinson	< 750	UNI-CAST	seco	15	delta	100	10,5	(4)
Grupo 2: Os que consideram que a inrush é moderada:								
UNIÃO Transf.	300	DRY TECH	seco	36,2	delta	105	6,6	(5)
UNIÃO Transf.	300	DRY TECH	seco	24,2	delta	105	6,2	(6)
UNIÃO Transf.	150	DRY TECH	seco	13,8	delta	105	5,8	(7)
Christophe Prévé	160		seco	qq		qq	5,3	(8)
TAMURA Indusul	150	RESI-DRY	seco	24,2	delta	105	4,9	(9)
TAMURA Indusul	150	RESI-DRY	seco	13,8	delta	105	4,5	(10)
ABB	200		seco	qq		qq	4,3	(11)
SCHNEIDER	160	TRIHAL	seco	10 ou 10/22,9	delta		4,2	(12)

(1) Norma Técnica GED-16628

(2) Revista O Setor Elétrico, Setembro 2010, Proteção dos transformadores, Parte I

(3) Norma Técnica ND-5.3

(4) Philip J. Hopkinson, IEEE, Transformers Committee-Meeting Minutes-November 11, 1998-Inrush Currents For Medium Voltage Transformers

(5) Valor original 16xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz admitindo constante de tempo=0,15s

(6) Valor original 15xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz admitindo constante de tempo=0,15s

(7) Valor original 14xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz admitindo constante de tempo=0,15s

(8) Dados 50Hz. Livro: Protection of Electrical Networks- Editora ISTE- 2006- Valor original 12xIN, valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,20s

(9) Valor original 12xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,14s

(10) Valor original 11xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,14s

(11) Dados 50Hz. Valor original 10,5xIN, valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,15s. "MV/LV Transformer Substations-Theory and Examples Of Short-Circuit -Calculation Technical Application Papers-2008-Pg.30"

(12) Dados 50Hz. Valor original 10,5xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,13s-"Catálogo TRIHAL SCHNEIDER 50 Hz, fabricação europeia, 10 ou 10/22,9 kV, Dyn11"

VIII. COMPARATIVO DE CORRENTES INRUSH PARA TRANSFORMADORES A SECO DE MÉDIA POTÊNCIA

A agregação é feita agora para transformadores a seco de média potência:

Transformadores de Distribuição - Corrente Inrush, valor eficaz, t=0,10s								
Comparação entre Normas, Concessionárias e Fabricantes								
a Seco - MÉDIA POTÊNCIA (≈ 1000 kVA)								
Fonte de Referência	Potência kVA	Modelo	Tipo	Tensão kV	Grupo Ligação Primário	Elevação de Temperatura (°C)	Inrush /IN (valor eficaz)	Referência
Grupo 1: Os que consideram que a inrush é muito elevada:								
CPFL Energia			seco	qq	delta	qq	14	(1)
Cláudio Mardegan	qq		seco	qq	delta	qq	14	(2)
CEMIG	<2000		a óleo ou epóxi	qq	delta	qq	10,5	(3)
Philip J. Hopkinson	>1000	UNI-CAST	seco	15	delta	100	9,2	(4)
Grupo 2: Os que consideram que a inrush é moderada:								
UNIÃO Transf.	1000	DRY TECH	seco	36,2	delta	105	6,2	(5)
UNIÃO Transf.	1000	DRY TECH	seco	24,2	delta	105	5,8	(6)
UNIÃO Transf.	1000	DRY TECH	seco	13,8	delta	105	5,3	(7)
Christophe Prévé	1000		seco	qq		qq	4,9	(8)
TAMURA Indusul	1000	RESI-DRY	seco	24,2	delta	105	4,8	(9)
TAMURA Indusul	1000	RESI-DRY	seco	13,8	delta	105	4,8	(10)
ABB	800-1000		seco	qq		qq	4,9	(11)
SCHNEIDER	1000	TRIHAL	seco	10 ou 10/22,9		qq	4,8	(12)
WEG	1000		seco	13,8	delta	105	4,5	(13)

(1) Norma Técnica GED-16628

(2) Revista O Setor Elétrico, Setembro 2010, Proteção dos transformadores, Parte I

(3) Norma Técnica ND-5.3

(4) Philip J. Hopkinson, IEEE, Transformers Committee-Meeting Minutes-November 11, 1998-Inrush Currents For Medium Voltage Transformers

(5) Valor original 13xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz admitindo constante de tempo=0,30s

(6) Valor original 12xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz admitindo constante de tempo=0,30s

(7) Valor original 11xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz admitindo constante de tempo=0,30s

(8) Dados 50Hz. Livro: Protection of Electrical Networks- Editora ISTE- 2006- Valor original 10xIN, valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,35s

(9) Valor original 10xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,29s

(10) Valor original 10xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,32s

(11) Dados 50Hz. Valor original 10xIN, valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,30s. "MV/LV Transformer Substations-Theory and Examples Of Short-Circuit -Calculation Technical Application Papers-2008-Pg.30"

(12) Dados 50Hz. Valor original 10xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,30s-"Catálogo TRIHAL SCHNEIDER 50 Hz, fabricação europeia, 10 ou 10/22,9 kV, Dyn11"

⁽¹³⁾ Valor original 9,4xIN em valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,30s

IX. COMPARATIVO DE CORRENTES INRUSH PARA TRANSFORMADORES A ÓLEO DE BAIXA POTÊNCIA

Para os transformadores à óleo, de baixa potência, temos as seguintes referências para comparação:

Transformadores de Distribuição - Corrente Inrush, valor eficaz, t=0,10s								
Comparação entre Normas, Concessionárias e Fabricantes								
a Óleo - BAIXA POTÊNCIA (≈ 150 kVA)								
Fonte de Referência	Potência kVA	Modelo	Tipo	Tensão kV	Grupo Ligação Primário	Elevação de Temperatura (°C)	Inrush /IN (valor eficaz)	Referência
Grupo 1: Os que consideram que a inrush é muito elevada:								
CPFL Energia	< 1000		óleo		delta		10	(1)
Cláudio Mardegan	< 1000		óleo		delta		10	(2)
Philip J. Hopkinson	< 750		óleo		delta	65	9	(3)
CEMIG	<2000		óleo		delta		8	(4)
Grupo 2: Os que consideram que a inrush é moderada:								
Christophe Prévé	160		óleo				5,3	(5)
ABB	160		óleo				5,3	(6)

⁽¹⁾ Norma Técnica GED-16628

⁽²⁾ Revista O Setor Elétrico, Setembro 2010, Proteção dos transformadores, Parte I

⁽³⁾ Philip J. Hopkinson, IEEE, Transformers Committee-Meeting Minutes- November 11, 1998-Inrush Currents for Medium Voltage Transformers

⁽⁴⁾ Norma Técnica ND-5.3

⁽⁵⁾ Dados 50Hz. Livro: Protection of Electrical Networks- Editora ISTE- 2006- Valor original 12xIN, valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,20s

⁽⁶⁾ Dados 50Hz. Valor original 12xIN, valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,20s. "MV/LV Transformer Substations-Theory and Examples Of Short-Circuit -Calculation Technical Application Papers-2008-Pg.30"

X. COMPARATIVO DE CORRENTES INRUSH PARA TRANSFORMADORES A ÓLEO DE MÉDIA POTÊNCIA

Para os transformadores a óleo, de média potência, são feitas as seguintes comparações:

Transformadores de Distribuição - Corrente Inrush, valor eficaz, t=0,10s								
Comparação entre Normas, Concessionárias e Fabricantes								
a Óleo - MÉDIA POTÊNCIA (≈ 1000 kVA)								
Fonte de Referência	Potência kVA	Modelo	Tipo	Tensão kV	Grupo Ligação Primário	Elevação de Temperatura (°C)	Inrush /IN (valor eficaz)	Referência
Grupo 1: Os que consideram que a inrush é muito elevado:								
CPFL Energia	> 1000		óleo		delta		8	(1)
Cláudio Mardegan	> 1000		óleo		delta		8	(2)
Philip J. Hopkinson	> 1000		óleo		delta	65	6,9	(3)
Grupo 2: Os que consideram que a inrush é moderado:								
Christophe Prévé	1000		óleo				4,9	(4)
ABB	1000		óleo				4,9	(5)

⁽¹⁾ Norma Técnica GED-16628

⁽²⁾ Revista O Setor Elétrico, Setembro 2010, Proteção dos transformadores, Parte I

⁽³⁾ Philip J. Hopkinson, IEEE, Transformers Committee-Meeting Minutes- November 11, 1998-Inrush Currents For Medium Voltage Transformers

⁽⁴⁾ Dados 50Hz. Livro: Protection of Electrical Networks- Editora ISTE- 2006- Valor original 10xIN, valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,35s

⁽⁵⁾ Dados 50Hz. Valor original 10xIN, valor de pico, convertido para valor eficaz com base na constante de tempo=0,35s. "MV/LV Transformer Substations-Theory and Examples Of Short-Circuit -Calculation Technical Application Papers-2008-Pg.30"

XI. MEDIÇÕES DE CORRENTE INRUSH FEITAS EM LABORATÓRIOS

Os experimentos realizados nos laboratórios adotaram estratégias de energização, com critérios sistematizados, de modo a captar a corrente inrush máxima.

a) *Nicola Chiesa*

O Dr. Nicola Chiesa realizou uma excepcional experiência investigativa de inrush, em laboratório, com chaveamento controlado com precisão. Foram realizadas mais de 400 sequências de desenergização / energização em dois transformadores de distribuição, à óleo, de 300 kVA e de 800 kVA, núcleo de 3 pernas, 11.430 / 0.235 kV, Yyn, fabricados entre 1975 e 1976 por *Møre Trafo AS*.

‘Compilamos os resultados finais desses ensaios :

Medições de Corrente Inrush - Dr. Nicola Chiesa				
Transformador de distribuição à <u>óleo</u>				
pior caso verificado				
Potência nominal do transformador		pico máximo		corrente eficaz em 0,10s
		medido		calculada
Potência (kVA)	Amperes (A _{eficaz})	Amperes (A _{pk})	Inrush /In (A _{pk} /A _{eficaz})	Inrush /In (A _{eficaz} /A _{eficaz})
300	15,2	200	13,2	6,2 ⁽¹⁾
800	40,4	560	13,9	6,7 ⁽²⁾

⁽¹⁾ Valor original 13,2xIN, valor de pico, que convertimos para valor eficaz presumindo constante de tempo=0,25s

⁽²⁾ Valor original 13,9xI_N, valor de pico, que convertimos para valor eficaz presumindo constante de tempo=0,30s

Conclusão: a mais alta corrente inrush foi de **6,7x I_N**, com tempo=**0,10s**, no transformador a óleo de 800kVA.

b) *Francesco Muzi*

O Dr. Francesco Muzi relatou ensaios experimentais para inrush realizados no Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) da Itália, em um transformador de distribuição, a seco, de 1500 kVA, 11.000/415V, Delta/Estrela, com secundário a vazio. A experimentação consistiu de 12 testes com duração de 9 segundos; para cada teste o ângulo de fechamento da tensão de alimentação foi variado de 30 ° e os valores de pico da corrente inrush foram registrados.

Medições de Corrente Inrush - Dr. Francesco Muzi				
Transformador de distribuição à óleo				
pot. caso verificado				
Potência nominal do transformador		pico máximo		corrente eficaz em 0,10s
		medido		calculada
Potência (kVA)	Amperes (A _{eficaz})	Amperes (A _{pk})	Inrush /In (A _{pk} /A _{eficaz})	Inrush /In (A _{eficaz} /A _{eficaz})
1500	78,73	1086	13,8	6,9 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Valor original 13,8xI_N, valor de pico, que convertimos para valor eficaz presumindo constante de tempo=0,40s

Conclusão: neste transformador a seco de 1500 kVA a pior corrente inrush foi, com tempo=**0,40s**, de **6,9x I_N**.

c) *CESI Test Report*

Em 2012 foram realizados no Laboratório italiano CESI ensaios de corrente inrush em um transformador a seco de 1.900 kVA, 18/0,9 kV, Dy11,5, 50 Hz, impedância de C.C.=4,71%, corrente nominal primária=60,94 A, classe de isolamento F=70°, enrolamento com alumínio, peso total=9310 kg, fabricante TMC Transformatori Italia S.P.A. Foram 31 testes, com secundário a vazio, variando cada vez o ângulo da tensão em 12°:

Medições de Corrente Inrush - Laboratório CESI				
Transformador de distribuição à óleo				
pot. caso verificado				
Potência nominal do transformador		pico máximo		corrente eficaz em 0,10s
		medido		calculada
Potência (kVA)	Amperes (A _{eficaz})	Amperes (A _{pk})	Inrush /In (A _{pk} /A _{eficaz})	Inrush /In (A _{eficaz} /A _{eficaz})
1900	60,94	558,2	9,2	4,7 ⁽¹⁾

(1) Valor original 9,2xI_N, valor de pico, após convertermos para valor eficaz presumindo constante de tempo=0,45s

Conclusão: este transformador a seco de 1900 kVA teve corrente máxima inrush de 4,7x I_N no tempo presumido de 0,40s.

XII. TRANSFORMADOR BASE PARA ESTE ESTUDO

Para este estudo adotou-se como referência os transformadores a seco marca RESIDRY do fabricante Tamura Indusul cujos dados estão disponibilizados em catálogo público:

Transformadores de Distribuição a Seco de Distribuição - Características Elétricas - I -				
Marca	Fabricante	Grupo de ligação	Tensão nominal	
			Primário	Secundário
RESIDRY	Tamura Indusul	Dyn1	13,8kV	380/220V e 220/127V

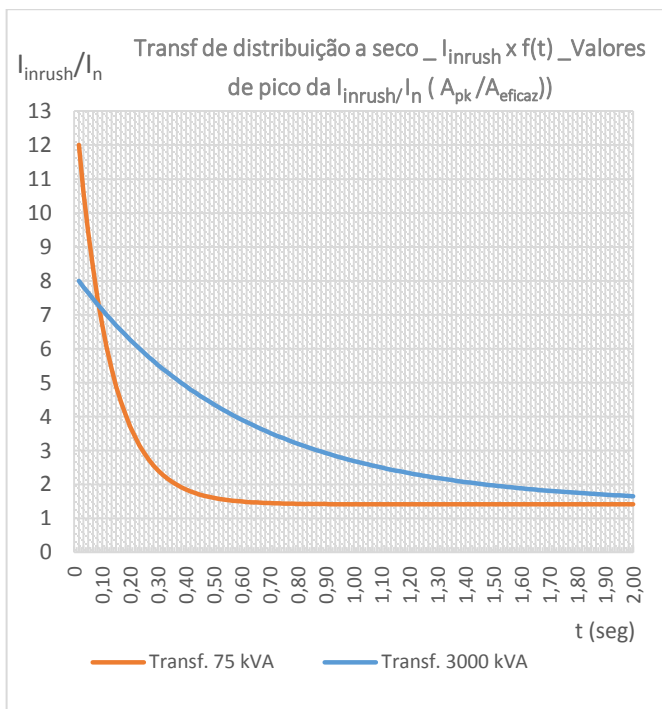
Potência nominal (kVA)	Corrente de inrush		Corrente a vazio (%)	Perdas à vazio (W)	Perdas em carga à 115°C (W)	Tensão de curto-circuito à 115°C (%)
	I/In (A pk)	Constante tempo (seg)				
75	12	0,12	3	480	1300	5,75
112,5	11,5	0,13	2,7	500	1900	5,75
150	11	0,14	2,5	580	2400	5,75
300	10	0,21	2,1	1100	3800	5,75
500	10	0,27	1,7	1500	6000	5,75
750	10	0,30	1,5	2300	8000	5,75
1000	10	0,32	1,5	2600	9500	5,75
1250	10	0,32	1,4	3200	11500	6,25
1500	9	0,40	1,4	3400	14000	6,25
2000	9	0,45	1,3	4500	18000	6,25
2500	9	0,50	1,2	6000	23000	6,25
3000	8	0,60	1,1	7500	28000	6,25

Transformadores de Distribuição a Seco de Distribuição - Características Elétricas - II -				
Marca	Fabricante	Grupo de ligação	Tensão nominal	
			Primário	Secundário
RESIDRY	Tamura Indusul	Dyn1	24,2kV	380/220V e 220/127V

Potência nominal (kVA)	Corrente de inrush		Corrente a vazio (%)	Perdas à vazio (W)	Perdas em carga à 115°C (W)	Tensão de curto-circuito à 115°C (%)
	I/In (A pk)	Constante tempo (seg)				
75	13	0,14	3,2	500	1500	6,75
112,5	12	0,14	2,6	580	2100	6,75
150	12	0,14	2,5	650	2500	6,75
225	12	0,16	2,3	1100	3500	6,75
300	11	0,18	2,3	1200	4200	6,75
500	11	0,23	1,9	1600	6300	6,75
750	10	0,26	1,7	2200	7500	6,75
1000	10	0,29	1,6	2800	10000	6,75
1250	10	0,34	1,6	3700	12000	6,75
1500	10	0,42	1,4	3600	14000	6,75
2000	8	0,48	1,3	4300	17000	7,25
2500	8	0,51	1,3	5500	24000	7,25
3000	8		1,2	8000	29000	7,25

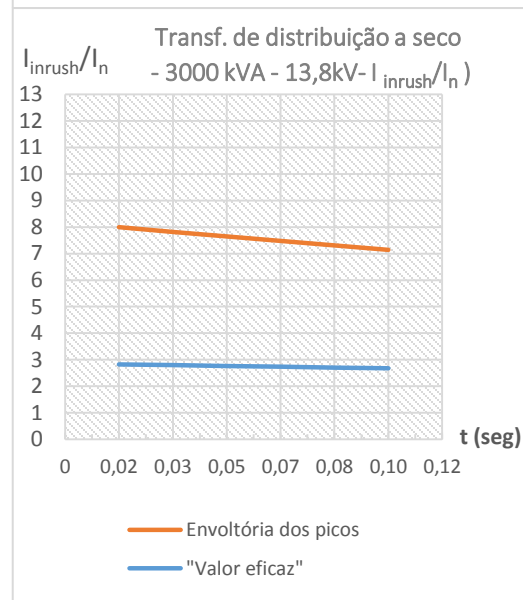
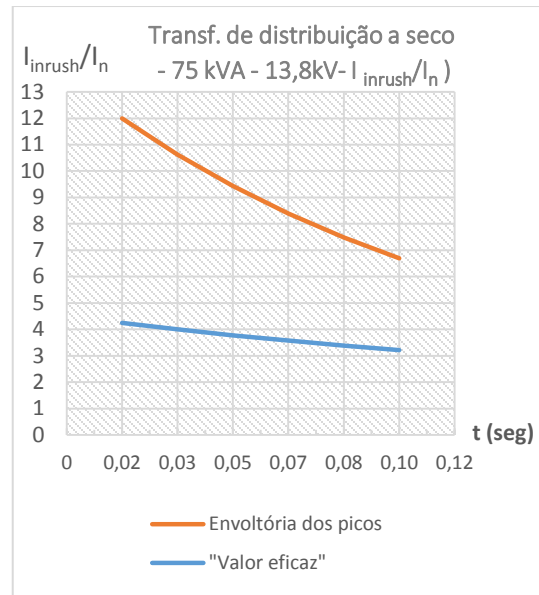
XIII. COMO FORAM OBTIDAS AS CORRENTES INRUSH?

Primeiramente foram obtidos o comportamento dos picos da Inrush em função do tempo.



Os transformadores de baixa potência apresentaram uma corrente inrush mais elevada, porém com amortecimento mais rápido; com relação aos de potências maiores.

Para finalizar obteve-se o “valor eficaz equivalente” acumulado da corrente inrush até atingir o tempo de 0,10 segundos. Seguem resultados para os transformadores de 75 kVA e 2000 kVA:



Concluindo, do ponto de vista de como o elo fusível “enxerga” o inrush, não se justifica sobredimensionar o elo fusível por conta do inrush.

XIV. PORQUE A CORRENTE INRUSH É TÃO ELEVADA ?

No transformador circula uma corrente no lado primário para estabelecer o enlace magnético com lado secundário, chamada de corrente de excitação a vazio. No transformador de distribuição a seco tem um valor 1-3% da corrente nominal, mas durante a energização é várias vezes maior que a sua corrente nominal

A corrente de magnetizante é elevada por 3 principais motivos:

1ª o ponto que estiver a curva de tensão no chaveamento do transformador, que determina a intensidade do fluxo magnético transitório.

2ª o fluxo residual no transformador, que depende do ponto na curva de tensão que ocorrer no desligamento do transformador.

3ª não linearidade da curva de histerese do transformador.