



# Proposta de Critério Analítico para Avaliação de Afundamento de Tensão em Sistemas de Distribuição Durante a Partida de Motores Elétricos de Indução

**Tema:** Qualidade de Energia

**Autores:** Laerty João dos Santos Damião

**Co-Autores:** Heliton de Oliveira Villibor, Arthur Henrique Bergamin, Mayara Gomes Delanhese, Ana Cláudia de Jesus Golzio, Ricardo Fonseca Buzo

**Empresa:** Companhia Paulista de Força e Luz

---

## Resumo

Provavelmente, o fenômeno elétrico mais amplamente estudado com relação aos motores elétricos de indução é o afundamento da tensão experimentada pelos sistemas elétricos durante o acionamento destes equipamentos. A depender da capacidade do motor e das características da rede, tal afundamento pode impactar a qualidade da energia elétrica e, como consequência, impactar cargas eletricamente próximas. Nesse sentido, a avaliação do afundamento de tensão em razão da partida de motores torna-se um ponto de interesse das distribuidoras de energia que, conforme REN 1000/2021 da ANEEL, deve realizar os estudos pertinentes para analisar o potencial de perturbação. Esse processo de avaliação normalmente é executado via simulações massivas e requer horas de dedicação do corpo técnico das distribuidoras, visto o grande número de solicitações de conexão de motores, principalmente pelas indústrias. Neste contexto, torna-se atrativa a implementação de um critério analítico que permita acelerar os processos de análises técnicas, resguardando o rigor técnico requerido. Frente a necessidade apontada, neste artigo, é proposta uma nova metodologia de simples aplicação que fornece a magnitude do afundamento de tensão causado na partida de um motor de indução, a qual se resume a uma equação matemática que requer apenas os dados básicos do motor e do sistema elétrico em análise. Para validar os resultados da metodologia proposta, são apresentadas comparações com os resultados obtidos via simulações no software CYME®, como forma de demonstrar sua aplicabilidade e precisão nas análises rotineiras de viabilidade de novas cargas potencialmente perturbadoras no sistema de distribuição.

## 1. Introdução

Na operação dos sistemas elétricos de distribuição é comum identificar a conexão dos mais variados tipos de equipamentos, principalmente quando se trata de instalações industriais. Tratando-se da qualidade da energia elétrica (QEE), um ponto de atenção se dá quando essas instalações utilizam equipamentos que, ao serem conectados à rede de distribuição, podem gerar oscilações de tensão durante seu funcionamento regular, resultando em cintilações (flicker) e/ou variações de tensão de curta duração (VTCDs). Entre os diversos equipamentos com esse potencial de perturbação da QEE, também denominados cargas elétricas especiais, pode-se citar fornos a arco, máquinas de solda e motores de indução (ELETROBRAS, 1985).

A depender da potência e das características do sistema elétrico, a operação de cargas elétricas especiais pode provocar oscilações de tensão que, por sua vez, podem causar perturbações no funcionamento das instalações de outros consumidores ligados na mesma rede de distribuição, especialmente aqueles dotados de equipamentos mais sensíveis a VTCDs (principalmente afundamentos de tensão), tais como máquinas injetoras, CLPs, inversores de frequência, entre outros equipamentos eletrônicos modernos utilizados em grandes indústrias com processos automatizados. Em uma situação mais abrangente, é possível que as oscilações de tensão provocadas por cargas especiais tenham influência no desempenho de outras cargas conectadas em alimentadores adjacentes que derivam de um mesmo barramento da subestação de origem.

Tratando-se especificamente dos motores elétricos, vê-se que esses equipamentos, paralelamente às melhorias dos sistemas elétricos, estão se tornando cada vez maiores e mais presentes nas indústrias (KUCUK, 2022). Neste cenário, se as técnicas de acionamento de motores não forem escolhidas adequadamente, pode-se ter como consequência o mau funcionamento ou danos ao próprio motor, problemas de QEE e, logo, impactos nos processos nos quais os motores estão inseridos. Conforme trata o padrão IEEE Std. 3002.7-2018, idealmente, um estudo de partida do motor deve ser conduzido antes que um motor de grande porte seja conectado, de modo que ele possa ser operado com a confiança de que sua vida útil e o desempenho de suas aplicações serão satisfatórios e o restante do sistema de distribuição de energia não será adversamente afetado (IEEE, 2018).

Diante da responsabilidade das concessionárias em assegurar a QEE, torna-se evidente que a análise de potenciais perturbações provocadas por cargas especiais não se restringe aos acessantes. Nesse contexto, conforme estabelece o Art. 73 da Resolução Normativa Nº 1000/2021 (ANEEL, 2021), as distribuidoras devem, se necessário, realizar estudos para avaliar o grau de perturbação das instalações do consumidor, bem como o impacto sistêmico de sua operação. No âmbito da CPFL, os requisitos para a conexão de cargas potencialmente perturbadoras podem ser verificados na norma interna GED 10099 (CPFL, 2020). Nesta norma, estão estabelecidas informações mínimas a serem fornecidas e critérios técnicos de aceitação que são utilizados na elaboração de estudos sistêmicos, os quais objetivam evitar possíveis impactos na QEE dos sistemas de distribuição e transmissão após a conexão de novas cargas potencialmente perturbadoras. Frente o contexto apresentado, neste trabalho é proposto o desenvolvimento de uma metodologia para cálculo do afundamento de tensão provocado durante a partida direta de motores de indução. O uso de uma metodologia baseada em equação de simples aplicação, tal como será apresentado, não substitui o potencial de uma simulação no domínio do tempo para os casos em que são requeridas análises mais precisas, uma vez que ela é útil para uma rápida avaliação da queda de tensão que pode impactar o sistema elétrico, podendo contribuir inclusive com a orientação da necessidade de aplicação de soluções mais sofisticadas. A importância de métodos como o proposto é ainda mais notada ao considerar a grande quantidade de solicitações de conexão de motores de indução recebidas e que devem ser analisadas pelas distribuidoras.

## **2. Desenvolvimento**

### *2.1. Análise de Viabilidade de Conexão de Cargas Perturbadoras*

Com o intuito de agir de forma proativa nas análises de novas conexões ou aumentos de carga que incluem cargas não perturbadoras, a CPFL tem implantado desde novembro de 2006 o documento normativo GED 10099, através do qual são estabelecidos critérios que devem ser seguidos pelos usuários do sistema

elétrico da CPFL ao conectar tais cargas (TORREZAN et al., 2010). Desde então, atualizações foram realizadas sobre este documento de modo a aperfeiçoar e esclarecer os critérios mínimos a serem adotados. Visto a existência de critérios bem definidos para a avaliação da conexão de cargas potencialmente perturbadoras, é válida a discussão de metodologias que possam avaliar esses critérios de forma simplificada, mantendo, no entanto, o rigor técnico. Isso se justifica principalmente porque existe uma grande demanda de análise para novas conexões de cargas potencialmente perturbadoras; logo, implantar um método analítico que permitirá realizar boa parte das análises de menor risco em menos tempo possibilitará a rápida emissão de orçamentos estimado ou de conexão para os acessantes.

Como forma de validar a metodologia a ser proposta, expõe-se nas seções seguintes os fundamentos que compõem a análise via simulação no software CYME® (como atualmente é feito para todos os casos que requerem análise de potencial perturbação por afundamento de tensão) e via cálculo matemático (proposto para casos menos críticos). Na sequência (seção 2.4) é apresentada uma comparação de resultados obtidos de ambos os métodos.

## 2.2. Análise do Afundamento de Tensão Durante Partida de Motores Utilizando o Software Cyme

Para as situações em que a partida de motores é realizada utilizando-se o software CYME® são necessários, após os procedimentos básicos de ajuste de demanda, a modelagem da nova carga baseada nas informações prestadas pelo acessante. No caso de motores, são necessárias as informações a seguir:

The figure displays two side-by-side screenshots of the CYME software interface for motor data entry.

**Left Window (General Tab):**

- Motor Type:** Radio buttons for Single-phase and Three-phase (selected).
- Nominal Data:**
  - Mechanical Power: 1000,0 hp (selected) or 746,0 kW.
  - Rated Voltage: 0,48 kVLL.
  - Synch. Speed: 1800,0 RPM.
  - Rated Power: 1008,79 kVA.
  - ANSI Group: Automatic.
  - Full Load Current: 1213,3854 A.
  - NEMA Code: E.
  - Efficiency: 87,0 % at 50%, 75%, and 100% load.
  - Power Factor: 85,0 % at 50%, 75%, and 100% load.
- Subtransient Impedance:**
  - Options: Compute from the Locked Rotor Data, Compute from the Equivalent Circuit, or User Defined (selected).
  - User Defined fields: R = 0,00845, X = 0,211, and p.u. (selected).
- Locked Rotor Data:**
  - Power Factor: 40,0 %.
  - Options: 4,8 kVA / hp (selected), 5773,5 A, or 4,75818 p.u.

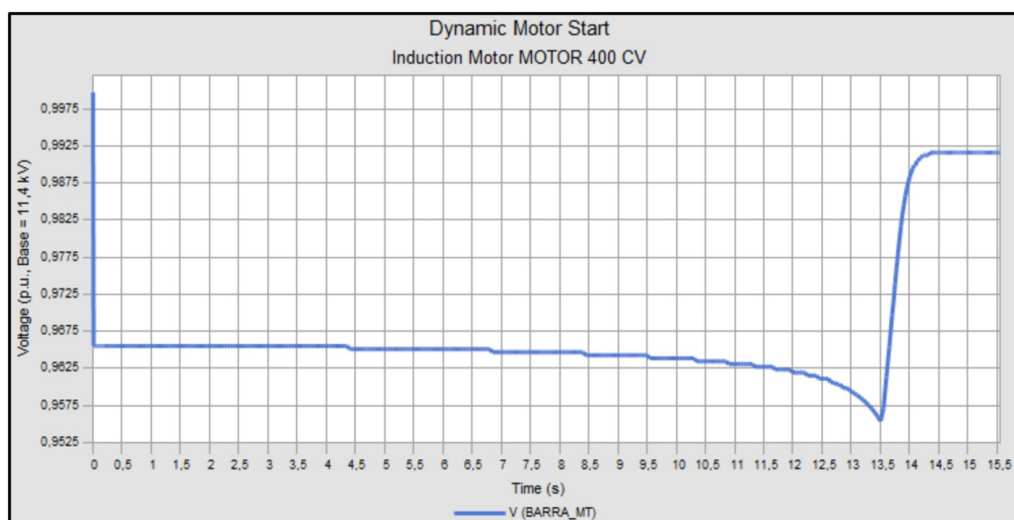
**Right Window (Equivalent Circuit Tab):**

- Rotor Type:** Radio buttons for Single circuit (selected), Double circuit, and Deep bar.
- Equivalent Circuit Diagram:** Shows a schematic diagram of the motor's equivalent circuit with parameters  $R_s$ ,  $X_s$ ,  $R_m$ ,  $X_m$ , and rotor impedances  $R_r \cdot (1 + CF_r \cdot s)$  and  $X_r \cdot (1 + CF_r \cdot s)$ .
- Impedances & Cage Factors:**
  - Estimation Method: Locked Rotor / Full Load Test (Zeq).
  - Stator:  $R_s = 0,0822$ ,  $X_s = 0,1451$ .
  - Magnetising:  $R_m = 15,1$ ,  $X_m = 3,02$ .
  - Rotor:  $R_r = 0,0212$ ,  $X_r = 0,1451$ .
  - Cage Factor:  $CF_r = 0,8$ ,  $CF_x = -0,1$ .
- Motor Inertia:**
  - Options: H: 0,8056 MW·s / MVA or J: 4,47 kg·m² (selected).

**Figura 1** – Dados de entrada no software Cyme para modelagem de motores.

- Tipo do motor: monofásico ou trifásico;
- Potência mecânica;
- Tensão nominal.
- Velocidade síncrona;
- Código NEMA;
- Eficiência a 50%, 75% e 100% da carga nominal;
- Fator de potência a 50%, 75% e 100% da carga nominal;
- Inércia do motor;
- Impedância de rotor e estator.

Exceto pelo último item, que é estimado pelo próprio software a partir dos dados de entrada, as informações necessárias à simulação do motor são requeridas do cliente por meio de formulário próprio disponível no GED 10099 da CPFL. Dessa forma, ao se modelar o motor com as informações fornecidas, utiliza-se o módulo Dynamic Analysis para executar a partida no domínio do tempo, de acordo com o método de partida indicada pelo próprio cliente (soft-starter, inversor de frequência, partida direta, estrela-triângulo etc.). Um exemplo de partida de motor é apresentado na Figura 2.



**Figura 2** – Perfil de tensão RMS, em p.u., em um barramento de média tensão durante partida de motor. Conforme GED 10099 (CPFL, 2020), os equipamentos que ocasionem transitórios em sua partida e/ou operação, deverão atender ao limite máximo de 5,0% de queda de tensão admissível, em seu ponto de conexão, ou PAC (ponto de acoplamento comum). Portanto, ao se obter a curva de partida do motor, calcula-se o máximo percentual da queda de tensão para avaliar a viabilidade de conexão da nova carga. Apesar do simples critério para análise da viabilidade da conexão de motores, a simulação de possíveis impactos ocasionados por partida de novos motores torna-se exaustiva devido ao elevado número de solicitações recebidas. Nesse sentido, surge a motivação de buscar-se na literatura um método analítico que, sem prejudicar o rigor técnico da análise, possa ser utilizado para obter o valor aproximado da queda de tensão durante a partida de motores. Assim, uma vez determinado um modelo, um critério conservador pode ser aplicado para delimitar o que não precisa ser simulado (por exemplo, pequenos motores que não causarão grande impacto) e o que precisa ser simulado (por exemplo, motores de grande porte cuja queda de tensão provocada na partida se aproxime do limite máximo), ou seja, indicar a necessidade ou não de análises detalhadas e mais exaustivas.

### 2.3. Análise do Afundamento de Tensão Durante Partida de Motor via Método Analítico

Um método para o cálculo do afundamento de tensão durante a partida de motores pode ser desenvolvido para que a análise de viabilidade dessas cargas seja conduzida de forma simplificada sem prejuízo ao rigor técnico requerido nesse processo. Para isso, as quedas de tensão devido à partida desses equipamentos são formuladas e analisadas usando o sistema elétrico e os dados técnicos do motor, visto que existe uma relação entre a queda percentual de tensão e a potência/impedância de curto-circuito nos terminais do motor em partida. Nessa relação, quanto maior for a potência de curto-circuito, ou, equivalentemente, menor for a impedância de curto-circuito no ponto onde o motor está conectado, menor será a queda de tensão que ocorre durante a partida do motor (KUCUK, 2022).

#### 2.3.1. Dados Requisitos para Modelagem da Rede e Componentes

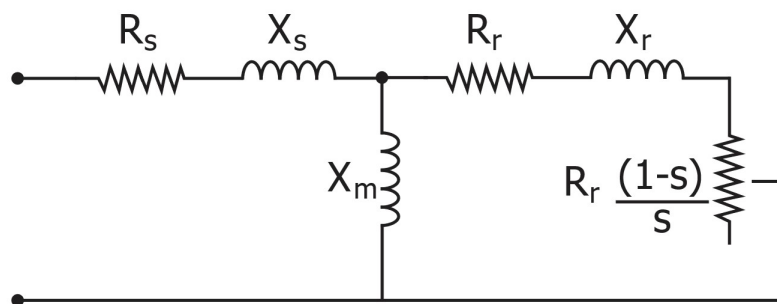
Com o objetivo de se aplicar um modelo matemático representativo, requer-se, minimamente, as seguintes informações:

(a) Impedância de curto-circuito trifásico no Ponto de Acoplamento Comum ( $Z_{cc,pac}$ ) do cliente: deve ser dada em Ohms ou em p.u. Caso em p.u., garantir: (i) Tensão Base igual à tensão nominal do sistema; e (ii) Potência Base igual 100 MVA (exemplo).

(b) Impedância do transformador ( $Z_{tr}$ ): deve ser obtida a partir dos dados informados pelo cliente. Normalmente, a impedância do TR é informada em valor p.u. referente às bases nominais do equipamento. No entanto, para aplicá-la ao cálculo é necessário obtê-la em Ohms ou referenciá-la às bases do sistema.

(c) Impedância do motor ( $Z_{motor}$ ): pode ser obtida a partir dos dados de corrente nominal e de corrente de rotor bloqueado do motor.

Seja o circuito equivalente do motor conforme a Figura 3.

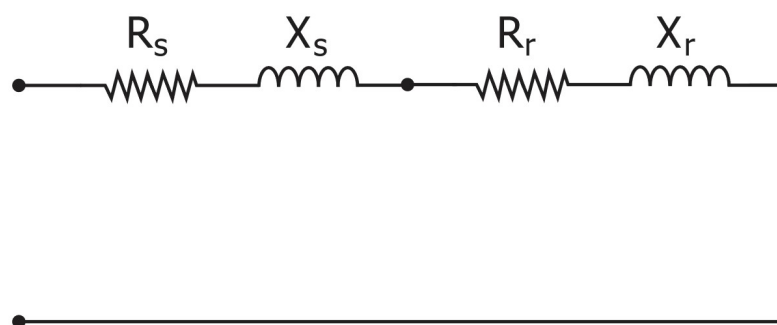


**Figura 3** – Circuito equivalente do motor de indução.

onde:

- $X_s$ : reatância de dispersão do estator
- $X_r$ : reatância de dispersão do rotor
- $R_s$ : resistência do estator
- $R_r$ : resistência do rotor
- $X_m$ : reatância de magnetização
- $s$ : escorregamento em p.u. da velocidade síncrona

Observa-se que, em condições de rotor bloqueado (momento inicial da partida), a resistência variável  $R_r(1-s)/s$  é nula, pois  $s=1$  (escorregamento máximo). Logo, o circuito equivalente se reduz a um circuito série  $(R_s+R_r)+j(X_s+X_r)$ , visto que  $jX_m$  é muito maior que  $R_r+jX_r$ , conforme a Figura 4 (ELETROBRAS, 1985).



**Figura 4** – Circuito equivalente do motor de indução em condições de rotor bloqueado.

Do circuito da Figura 4, as resistências podem ser desprezadas de modo que a impedância do motor passa a ser dada pela reatância de rotor bloqueado ( $X''=X_r+X_s$ ). A reatância de rotor bloqueado normalmente não é facilmente conhecida, porém pode-se calculá-la da seguinte forma (ELETROBRAS, 1985; MARDEGAN, 2022):

$$X'' = \frac{I_n}{I_{rb}} \quad (1)$$

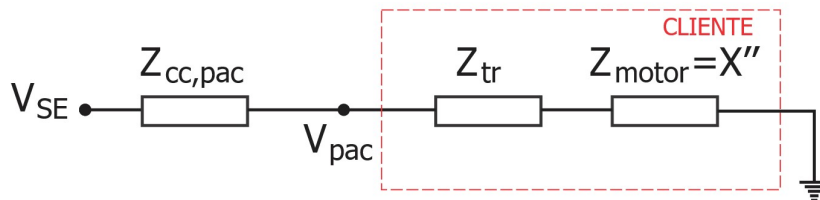
onde:

- $I_n$ : corrente nominal
- $I_{rb}$ : corrente de rotor bloqueado ou corrente de partida

O resultado obtido em (1) está em p.u. na base do motor. Caso os cálculos estejam sendo realizados em valores reais, basta utilizar os valores base do próprio motor para obter o resultado de (1) em ohm.

### 2.3.2. Desenvolvimento do Modelo Matemático Proposto

Para cálculo do afundamento de tensão no PAC, considera-se o circuito equivalente da Figura 5.



**Figura 5** – Circuito equivalente de atendimento ao cliente.

A tensão no PAC durante a partida do motor será:

$$V_{pac} = V_{se} \times \frac{Z_{cc,pac}}{Z_{cc,pac} + Z_{tr} + Z_{motor}} \quad (2)$$

Portanto, a queda de tensão percentual pode ser obtida por:

$$\Delta V = \frac{V_{pac}}{V_{se}} \times 100\% \quad (3)$$

Considerando a tensão da subestação  $V_{se}=1,0$  p.u., tem-se a queda de tensão aproximada no PAC devido a partida de um motor (partida direta):

$$\Delta V = \frac{Z_{cc,pac}}{Z_{cc,pac} + Z_{tr} + Z_{motor}} \times 100\% \quad (4)$$

### 2.4. Comparação de Metodologias: Resultados e Discussões

A fim de comparar os valores da queda de tensão durante partida de motores obtida por simulação e via Equação (4), serão consideradas redes de distribuição equivalentes que contemplam valores médios de características elétricas de alimentadores reais em diversos pontos de rede. Dessa forma, apresenta-se



nas seções seguintes os resultados obtidos em sistemas de distribuição representativos de média tensão (SDMT) e de alta tensão (SDAT).

2.4.1. Avaliação em SDMT

As características elétricas típicas em diversos pontos de um SDMT são fornecidas na Tabela 1. Nessa tabela, cada ponto de rede constitui uma distância da subestação (SE), de modo que o ponto A é o mais distante (menor relação X/R) e o ponto J é o mais próximo da SE (maior relação X/R).

Tabela 1 – Características elétricas típicas de SDMTs.

Ponto	Nível de CC 3F (kA)	Valores sequenciais (Ω)				x1/r1
		R1	X1	R0	X0	
A	0,10-0,20	40,46	18,86	6,80	17,65	0,45
B	0,20-0,30	27,03	13,19	4,74	12,32	0,48
C	0,30-0,40	18,54	10,28	3,64	9,66	0,51
D	0,40-0,50	13,84	7,60	2,78	7,52	0,55
E	0,50-0,75	9,94	5,86	2,21	5,88	0,59
F	0,75-1,00	6,33	4,98	1,91	5,38	0,78
G	1,00-1,50	3,72	3,89	1,55	4,31	1,06
H	1,50-2,00	2,27	3,13	1,12	3,42	1,31
I	2,00-3,00	1,30	2,51	0,77	2,67	1,89
J	3,00-6,00	0,62	1,76	0,42	1,87	2,86

Utilizando os dados da tabela acima, pode-se, portanto, representar o SDMT conforme ilustrado na Figura 6.

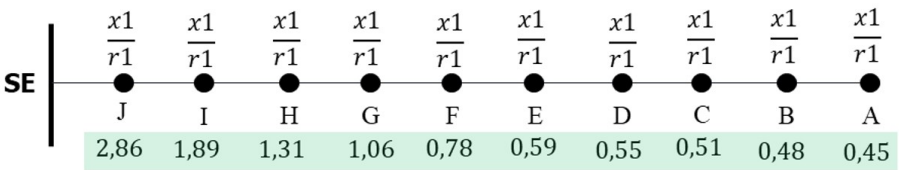


Figura 6 – Rede simplificada que contempla características elétricas típicas encontradas em SDMTs. Para os cenários de teste serão considerados motores de indução de diferentes relações Ip/In (corrente de partida/corrente nominal) com valores de impedâncias indicados nas Tabela 2 a 4. A partida direta desses motores será, por sua vez, avaliada no SDMT cuja tensão nominal é 11,4 kV, considerando a conexão dos motores por meio de um transformador 11.400/380 V.

Tabela 2 – Características elétricas dos motores com relação Ip/In entre 8 e 9 a serem utilizados para comparação de resultados no SDMT.

Potência Motor (CV)	Motores com relação Ip/In = 9-8			
	Rs (Ω)	Xs (Ω)	Rr (Ω)	Xr (Ω)
75	0,0144	0,1176	0,0462	0,1176
100	0,0138	0,0917	0,0346	0,0917
300	0,0077	0,0347	0,0117	0,0347
400	0,0055	0,0258	0,0088	0,0258

Tabela 3 – Características elétricas dos motores com relação Ip/In entre 7 e 8 a serem utilizados para comparação de resultados no SDMT.

Potência Motor (CV)	Motores com relação $I_p/I_n = 8-7$			
	$R_s (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$R_r (\Omega)$	$X_r (\Omega)$
75	0,0437	0,1512	0,0453	0,1512
100	0,0261	0,104	0,0334	0,1040
200	0,0301	0,0458	0,0044	0,0458
400	0,0071	0,0271	0,0086	0,0271

**Tabela 4** – Características elétricas dos motores com relação  $I_p/I_n$  entre 5 e 7 a serem utilizados para comparação de resultados no SDMT.

Potência Motor (CV)	Motores com relação $I_p/I_n = 7-5$			
	$R_s (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$R_r (\Omega)$	$X_r (\Omega)$
75	0,0846	0,1935	0,0421	0,1935
100	0,0639	0,1161	0,018	0,1161
200	0,0430	0,0657	0,0064	0,0657
300	0,0121	0,0387	0,0111	0,0387
400	0,0197	0,0329	0,0042	0,0329

Na Tabela 5 é apresentado, portanto, o comparativo do afundamento de tensão calculado conforme Equação (4) e simulado via software CYME® durante a partida direta dos motores. Para cada simulado, expõe-se o valor do desvio absoluto entre os resultados obtidos.

**Tabela 5** – Resultados de afundamento de tensão obtidos no SDMT via método analítico (proposto) e simulação.



Potência Motor	Range Icc	Afundamento de Tensão na Partida Direta (Ip/In = 9-8)			Afundamento de Tensão na Partida Direta (Ip/In = 8-7)			Afundamento de Tensão na Partida Direta (Ip/In = 7-5)		
		Calculado	Simulado	Desvio Absoluto	Calculado	Simulado	Desvio Absoluto	Calculado	Simulado	Desvio Absoluto
75 CV	A	17,9	14,0	3,9	14,2	11,5	2,7	11,2	8,1	3,1
	B	12,6	9,8	2,7	9,9	8,0	1,9	7,8	5,9	1,9
	C	9,1	7,3	1,8	7,1	5,9	1,2	5,5	4,4	1,2
	D	6,9	5,5	1,4	5,4	4,4	1,0	4,2	3,3	0,9
	E	5,1	4,3	0,8	3,9	3,3	0,6	3,1	2,4	0,6
	F	3,6	3,2	0,4	2,8	2,5	0,3	2,2	1,8	0,4
	G	2,4	2,3	0,2	1,9	1,8	0,1	1,4	1,3	0,1
	H	1,7	1,7	0,1	1,3	1,4	0,0	1,0	1,0	0,0
	I	1,3	1,3	0,0	1,0	1,0	0,0	0,8	0,7	0,0
	J	0,8	0,8	0,0	0,7	0,7	0,0	0,5	0,5	0,0
100 CV	A	22,1	Não parte	-	19,7	Não parte	-	17,5	14,8	2,7
	B	15,7	13,1	2,6	13,9	11,4	2,5	12,3	10,4	1,9
	C	11,4	9,5	1,9	10,1	8,2	1,9	8,9	7,5	1,4
	D	8,7	7,1	1,6	7,7	6,4	1,3	6,8	5,6	1,2
	E	6,4	5,4	1,0	5,7	4,9	0,8	5,0	4,4	0,6
	F	4,5	4,1	0,4	4,0	3,7	0,3	3,5	3,3	0,2
	G	3,1	2,9	0,2	2,7	2,6	0,1	2,4	2,3	0,1
	H	2,2	2,2	0,0	1,9	2,0	0,0	1,7	1,8	0,1
	I	1,6	2,7	1,1	1,4	1,5	0,1	1,3	1,3	0,0
	J	1,1	1,1	0,0	0,9	1,0	0,0	0,8	0,9	0,1
200 CV	A				36,0	Não parte	-	27,7	Não parte	-
	B				26,9	Não parte	-	20,1	Não parte	-
	C				20,2	Não parte	-	14,8	12,4	2,4
	D				15,7	12,8	2,9	11,4	9,7	1,7
	E				11,9	9,9	2,0	8,5	7,2	1,3
	F				8,5	7,7	0,8	6,0	5,6	0,4
	G				5,8	5,5	0,3	4,1	4,0	0,1
	H				4,2	3,8	0,4	3,0	3,0	0,0
	I				3,1	3,2	0,1	2,2	2,3	0,1
	J				2,1	2,1	0,0	1,5	1,5	0,0
300 CV	A	44,7	Não parte	-				41,4	Não parte	-
	B	34,3	Não parte	-				31,4	Não parte	-
	C	26,1	Não parte	-				23,8	Não parte	-
	D	20,6	Não parte	-				18,6	Não parte	-
	E	15,7	12,7	3,0				14,1	11,6	2,6
	F	11,3	9,8	1,5				10,1	8,9	1,3
	G	7,7	7,3	0,5				6,9	6,5	0,5
	H	5,6	5,4	0,3				5,1	4,9	0,2
	I	4,2	4,1	0,1				3,7	3,7	0,0
	J	2,8	2,7	0,1				2,5	2,5	0,0
400 CV	A	52,9	Não parte	-	51,4	Não parte	-	44,8	Não parte	-
	B	41,9	Não parte	-	40,4	Não parte	-	34,5	Não parte	-
	C	32,7	Não parte	-	31,4	Não parte	-	26,4	Não parte	-
	D	26,2	Não parte	-	25,1	Não parte	-	20,9	Não parte	-
	E	20,2	Não parte	-	19,3	Não parte	-	16,0	13,3	2,7
	F	14,7	12,2	2,5	14,0	11,9	2,1	11,5	10,2	1,3
	G	10,2	9,0	1,2	9,7	8,6	1,1	7,9	7,4	0,5
	H	7,5	6,9	0,6	7,1	6,6	0,5	5,8	5,6	0,2
	I	5,5	5,3	0,3	5,3	5,0	0,2	4,3	4,3	0,0
	J	3,7	3,5	0,2	3,5	3,4	0,2	2,9	2,9	0,0

Atende critério GED 10099      Não atende critério GED 10099

Dos resultados obtidos, uma observação evidente é que os valores de afundamento de tensão calculados e simulados são, para a maioria dos pontos de rede considerados e para valor de  $I_p/I_n$  nominal, muito próximos entre si, principalmente quando se analisa aqueles pontos com maior nível de curto-circuito. Em outras palavras, isso significa que, quanto maior for a relação  $X/R$ , menor serão os erros entre os métodos, ou, equivalentemente, menor serão os efeitos das simplificações adotadas para se chegar ao modelo da Equação (4). Uma consequência direta dessa observação é que, ao adotar-se o critério de máxima queda de tensão permitida igual 5,0% durante a partida de motor, conforme GED 10099, as decisões de aprovação ou reprovação da viabilidade de novas cargas é a mesma para a maior parte dos cenários analisados, independentemente do método utilizado (cálculo ou simulação). Na verdade, há de se ressaltar que os casos em que há divergência nas decisões de aprovar ou reprovar a viabilidade ocorrem devido a pequena variação dos resultados de ambos os métodos, que resulta em valores próximos que permeiam acima e abaixo o limite permitido. É o caso que se observa na partida direta do motor 300 CV ( $I_p/I_n = 7-5$ ) cuja queda de tensão calculada é de 5,1% e a simulada é de 4,9%, ou seja, valores próximos e simétricos ao valor limite (5,0%).

Complementando a análise dos resultados, uma observação obtida é que, para o mesmo sistema, a chance de um motor partir em diversos pontos de rede sem causar grandes impactos é maior quando menor for a potência nominal da máquina. Adicionalmente, outra observação válida de ser apontada é que a Equação (4), por ser um modelo matemático simplificado que não considera toda a dinâmica de um motor, sempre resultará em um valor de afundamento de tensão, mesmo que, na realidade, não seja possível realizar a partida do motor. Nesse sentido, ao se observar os resultados da Tabela 5, nota-se que, nas condições im-

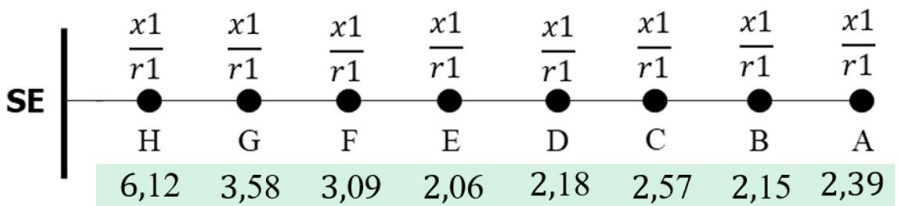
postas, os motores normalmente não partirão quando a queda de tensão calculada for próxima ou superior a 20%, ou seja, muito além do que o GED 10099 considera como requisito de aprovação desse tipo de carga.

### 2.4.2. Avaliação em SDAT

De modo equivalente à representação do SDMT, aplica-se o mesmo raciocínio para representar o SDAT. Nesse caso, os valores médios das características elétricas distribuídas em oito pontos da rede (A a G) são fornecidos na Tabela 6. Dessa forma, uma representação gráfica do SDAT equivalente a ser aplicado no teste é ilustrado na Figura 7.

**Tabela 6** – Características elétricas típicas de SDATs 69 kV.

Ponto	Nível de CC 3F (kA)	Impedância de CC (Ω)				x1/r1
		R1	X1	R0	X0	
A	0,75-1,00	17,85	42,59	26,43	104,63	2,39
B	1,00-1,25	13,85	29,79	19,68	74,75	2,15
C	1,25-1,50	10,86	27,93	14,75	59,3	2,57
D	1,50-1,75	9,97	21,76	12,91	53,63	2,18
E	1,75-2,00	9,33	19,24	12,5	49,61	2,06
F	2,00-3,00	5,08	15,71	8,3	33,21	3,09
G	3,00-3,50	3,2	11,45	3,42	18,3	3,58
H	>3,50	1,57	9,62	0,44	7,39	6,12



**Figura 7** – Alimentador de distribuição equivalente que contempla características elétricas típicas encontradas em SDATs.

Para a construção dos cenários de teste serão considerados motores 500 a 1000 CV especificados conforme mostra as Tabela 7 e 8. A partida de tais motores em valores será avaliada, por sua vez, considerando um sistema de 69 kV.

**Tabela 7** – Características elétricas dos motores com relação Ip/In entre 7 e 8 a serem utilizados para comparação de resultados no SDAT.

Potência Motor (CV)	Motores com relação Ip/In = 8-7			
	Rs (Ω)	Xs (Ω)	Rr (Ω)	Xr (Ω)
500	0,0065	0,0279	0,0092	0,0279
700	0,0046	0,0199	0,0066	0,0199
1000	0,0044	0,0156	0,0047	0,0156

**Tabela 8** – Características elétricas dos motores com relação Ip/In entre 5 e 7 a serem utilizados para comparação de resultados no SDAT.

Potência Motor (CV)	Motores com relação $I_p/I_n = 7-5$			
	$R_s (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$R_r (\Omega)$	$X_r (\Omega)$
500	0,0095	0,0311	0,0091	0,0311
700	0,0067	0,0222	0,0065	0,0222
1000	0,0064	0,0176	0,0046	0,0176

Logo, a fim de comparar, novamente, o impacto quanto ao afundamento de tensão na partida direta dos motores, expõe-se a seguir os resultados obtidos via cálculo da Equação (4) e via simulação no software CYME®.

**Tabela 9** – Resultados de afundamento de tensão obtidos no SDAT via método analítico (proposto) e simulação.

Potência Motor	Range Icc	Afundamento de Tensão na Partida Direta ( $I_p/I_n = 8-7$ )			Afundamento de Tensão na Partida Direta ( $I_p/I_n = 7-5$ )		
		Calculado	Simulado	Desvio Absoluto	Calculado	Simulado	Desvio Absoluto
500 CV	A	3,1	3,1	0,0	2,8	2,8	0,0
	B	2,3	2,2	0,0	2,0	2,0	0,0
	C	2,1	2,0	0,0	1,8	1,8	0,0
	D	1,7	1,6	0,0	1,5	1,5	0,0
	E	1,5	1,5	0,0	1,3	1,3	0,0
	F	1,1	1,1	0,0	1,0	1,0	0,0
	G	0,8	0,8	0,0	0,7	0,7	0,0
	H	0,7	0,7	0,0	0,6	0,6	0,0
700 CV	A	4,3	4,1	0,2	3,9	3,8	0,1
	B	3,1	3,0	0,2	2,8	2,7	0,1
	C	2,9	2,7	0,1	2,6	2,5	0,1
	D	2,3	2,2	0,1	2,1	2,0	0,1
	E	2,1	2,0	0,1	1,8	1,8	0,1
	F	1,6	1,5	0,1	1,4	1,4	0,0
	G	1,2	1,1	0,1	1,0	1,0	0,0
	H	0,9	0,9	0,1	0,8	0,8	0,0
1000 CV	A	5,5	5,1	0,4	4,8	4,6	0,2
	B	3,9	3,7	0,3	3,5	3,3	0,2
	C	3,6	3,4	0,2	3,2	3,0	0,2
	D	2,9	2,7	0,2	2,6	2,4	0,1
	E	2,6	2,4	0,2	2,3	2,2	0,1
	F	2,0	1,9	0,1	1,8	1,7	0,1
	G	1,5	1,4	0,1	1,3	1,2	0,1
	H	1,2	1,1	0,1	1,1	1,0	0,1
		<div> <div></div> Atende critério GED 10099 <div></div> Não atende critério GED 10099 </div>					

Prontamente, a principal observação a ser apontada a partir dos valores da Tabela 9 é que no SDAT os resultados obtidos são ainda mais próximos quando se compara as duas metodologias aplicadas, o que se traduz em uma média de desvio absoluto de 0,1 ponto percentual. Isso ocorre em função da menor impedância de curto-circuito (e maior relação X/R) dos SDATs quando comparado aos SDMTs, o que faz com que eventuais desvios sobre a resistência das linhas sejam minimizados, reduzindo, assim, erros sobre o resultado.

Associado ao raciocínio descrito, um ponto de destaque nas simulações no SDAT é que a magnitude do afundamento de tensão na partida direta dos motores é consideravelmente menor. Conforme é esperado, essa constatação também se fundamenta na menor impedância de curto-circuito dos SDATs, o que confere maior robustez ao sistema.

### 2.4.3. Discussões

Ao comparar os resultados obtidos pela metodologia proposta com os resultados das simulações realizadas no software CYME®, ficou evidente que a nova abordagem é tão eficaz quanto as simulações tradicionais. Isso significa que, mesmo com a simplificação dos cálculos, a metodologia oferece resultados consistentes e precisos, especialmente em cenários com níveis de curto-circuito mais elevados, onde as simulações tendem a apresentar maior precisão.

De modo geral, nota-se também que um dos principais benefícios da metodologia proposta é a significativa redução no tempo necessário para a análise de viabilidade de novas cargas. A equação apresentada exige apenas dados básicos do motor e do sistema elétrico, como potência do motor (CV), corrente nominal (In), e características do sistema de distribuição, como impedância do alimentador. Por outro lado, as simulações no software CYME® demandam uma vasta quantidade de dados especialmente a respeito do modelo dinâmico do motor, além de exigir tempo significativo de processamento para a preparação da rede que será utilizada.

A seguir, apresenta-se um comparativo entre os dados necessários para realizar uma simulação no CYME® e os dados exigidos pela metodologia proposta, de forma a evidenciar a redução na quantidade de informações necessárias.

**Tabela 10** – Comparativo dos dados necessário para avaliação da queda de tensão durante partida de motores via simulação e via cálculo analítico proposto.

Parâmetro	Simulação no CYME®	Metodologia Proposta
Impedância de CC sistema	Sim	Sim
Impedância do TR ao qual o motor é conectado	Sim	Sim
Tensão motor	Sim	Não
Potência motor	Sim	Não
Corrente de partida	Sim	Não
Impedância motor (estator e rotor)	Sim	Sim
Fator de potência do motor (a 50%, 75% e 100% da carga nominal)	Sim	Não
Eficiência do motor (a 50%, 75% e 100% da carga nominal)	Sim	Não
Inércia do motor	Sim	Não
Inércia da carga do motor	Sim	Não
Modelo de carga do motor	Sim	Não

A tabela acima mostra claramente como o cálculo analítico proposto requer uma quantidade significativamente menor de informações para calcular o afundamento de tensão. Como consequência vê-se que a metodologia proposta permite maior agilidade nas análises, otimizando o tempo dos profissionais envolvidos e, consequentemente, melhorando a capacidade de resposta da distribuidora a solicitações de novos projetos.

### 2.5. Formulação de Critério Final para Tomada de Decisão Quanto a Conexão de Motores

Visto os resultados obtidos, um ponto de interesse é estabelecer um critério único e simples que permita avaliar de forma rápida se a conexão de um novo motor à rede traz algum tipo de risco à qualidade do produto em razão de potenciais afundamentos de tensão durante a partida dessas máquinas. Nesse sentido, um critério tecnicamente viável de ser adotado é utilizar a Equação (4) para uma estimativa inicial da provável queda de tensão, de modo que, caso seja ultrapassado um determinado limite inferior à máxima queda estabelecida no GED 10099, impor-se-á a realização de uma simulação completa para tomada de decisão. Assim, pode-se adotar o seguinte:

Se:



$$\Delta V_{analítico} = \frac{Z_{cc,pac}}{Z_{cc,pac} + Z_{tr} + Z_{motor}} \times 100\% \leq 3,0\% \quad (5)$$

Então, é válido tomar decisão de aprovar a conexão a partir do resultado da Equação (4). Caso contrário, proceder simulação para definir tomada de decisão.

No critério apresentado acima, o valor máximo de 3,0% para queda de tensão provocada devido a partida direta do motor foi escolhido porque, considerando todos os cenários testados (tanto no SDMT quanto no SDAT), os casos em que o resultado foi inferior a esse limite obteve baixo desvio absoluto (inferior a 0,5 ponto percentual) em relação ao valor que foi obtido via simulação. Dessa forma, entende-se que o critério descrito é viável e conservador, visto que ele considera motores partindo de forma direta (pior caso de partida), isto é, sem dispositivos de assistência (inversores de frequência ou soft-starters) e, além disso, considera uma margem de 40% abaixo do limite estabelecido no GED 10099 para que simulações específicas sejam conduzidas via software.

Cumprir destacar que, embora a metodologia proposta tenha se mostrado eficaz, ela não precisa, necessariamente, ser utilizada como ferramenta de decisão final. Na verdade, ela também pode ser vista como ferramenta útil para fornecer uma análise preliminar, ajudando a identificar rapidamente se o caso em questão requer uma análise mais detalhada por meio de simulações mais avançadas.

### 3. Conclusão

A análise do impacto de partida de motores sobre o sistema elétrico é crucial para garantir a estabilidade da qualidade da energia elétrica. Diante dessa situação e conforme abordado neste trabalho, é fundamental que a distribuidora de energia realize uma análise rigorosa no momento da aprovação da conexão desses motores, assegurando que as características da instalação estejam alinhadas com os padrões operacionais da rede, minimizando assim os riscos de impactos negativos. Normalmente isso é feito por simulação, porém a simplificação desse processo pode ser obtida, como demonstrado, através do cálculo analítico associado a um critério capaz de assegurar o rigor técnico requerido.

Ao se realizar o processo pelo modelo simplificado proposto, são esperados alguns benefícios importantes de serem considerados. Em primeiro lugar, essa abordagem proporciona maior rapidez na análise de orçamentos estimados e de conexão e na avaliação de solicitações de aumento de carga, resultando em um atendimento mais ágil aos próprios clientes. Além disso, ao utilizar o modelo proposto é possibilitado às equipes de engenharia um melhor gerenciamento de suas análises, conforme a complexidade de cada caso. Isso porque possibilita-se que os maiores esforços sejam direcionados para as solicitações em que uma avaliação via simulação no domínio do tempo seja realmente necessária. Essa otimização não só melhora a eficiência do trabalho das equipes, mas também garante a segurança da expansão do sistema elétrico através da conexão de novas cargas, assegurando a qualidade da energia em um cenário em que os processos desenvolvidos pelos clientes (principalmente industriais) estão cada vez mais exigentes quanto a esse aspecto.

### 4. Referências bibliográficas

ANEEL. Resolução Normativa Nº 1.000 de 7 de Dezembro De 2021. 2021.

CPFL. Requisitos para Conexão de Cargas Potencialmente Perturbadoras ao Sistema Elétrico da CPFL. 2020.

ELETROBRAS. Coleção Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Controle de Tensão em Sistemas de Distribuição. Vol. 5. Ed. Campus. 1985.

IEEE. 3002.7-2018 - IEEE Recommended Practice for Conducting Motor-Starting Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems. 2018.

KUCUK, Selahattin; AJDER, Ali. Analytical voltage drop calculations during direct on line motor starting: Solutions for industrial plants. Ain Shams Engineering Journal, v. 13, n. 4, p. 101671, 2022.

MARDEGAN, C. Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais. 2022.

TORREZAN, R.; AHN, S.; ESCOBAR, C. et al. Metodologia para Análise do Impacto de Cargas Potencialmente Perturbadoras na Qualidade da Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição. XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI). 2010.