

MODELAGEM DE MOTORES ASSÍNCRONOS VIA BANCADA DIDÁTICA COM DIFERENTES MÉTODOS DE ACIONAMENTOS E SIMULAÇÃO DE IMPACTOS NA REDE ELÉTRICA DE UMA PLANTA INDUSTRIAL REAL

Ingridt Cezar Ayres* Paulo Ricardo da Silva Pereira**

* Escola Politécnica, UNISINOS, RS (e-mail: ingridt.ayres@gmail.com)

** Escola Politécnica, UNISINOS, RS (e-mail: prpereira@unisinovs.br)

Abstract: Considering that, currently, the industrial sectors, focusing on factories of food production, have been increasingly involved in automation and data processing, the control of departures is carried out via programmable controller and systems of supervision, control and acquisition of data. Based on the current legislation to determine the limits of such disturbances and considering that most of the laws are aimed at the obligations of the concessionaires in relation to the product delivered to the final customer, this work has the objective of inverse analysis, focusing on quantifying and evaluating the impacts of the asynchronous machine drives in the secondary electrical system, which are responsible for several impacts on the quality of the product within the plant itself and in many cases from the concessionaire itself. Thus, the work highlights the positive and negative aspects for each trigger method from the perspective of the distribution procedures - PRODIST. Using computational simulation of a low voltage distribution network of an industrial plant with tools used by power distributors to quantify the impact on the voltage amplitude caused by the starting current of the induction motors of different powers considering different drive methods.

Resumo: Tendo em vista que, atualmente, os setores industriais, tendo enfoque em fábricas de produção alimentícia, vêm investindo cada vez mais em automação e processamento de dados, o controle das partidas é realizado via controlador programável e sistemas de supervisão, controle e aquisição de dados. Tendo como base a legislação vigente para determinação dos limites de tais distúrbios e considerando que a maioria das legislações visam as obrigações das concessionárias em relação ao produto entregue ao cliente final, este trabalho tem como objetivo a análise inversa, focando em quantificar e avaliar os impactos dos acionamentos de máquinas assíncronas no sistema elétrico secundário, sendo estes responsáveis por diversos impactos na qualidade do produto da dentro da própria planta e em muitos casos da própria concessionária. Dessa forma, o trabalho salienta os aspectos positivos e negativos para cada método de acionamento sob a perspectiva dos procedimentos da distribuição - PRODIST. Utilizando simulação computacional de uma rede de distribuição de baixa tensão de uma planta industrial, com ferramentas utilizadas pelas distribuidoras de energia, para quantificar o impacto na amplitude de tensão causados pela corrente de partida dos motores de indução de diferentes potências considerando diferentes métodos de acionamentos.

Keywords: Power quality; Asynchronous motors; Drive methods; Drives in the Industry; Drive Impact.

Palavras-chaves: Qualidade de energia; Motores assíncronos; Métodos de acionamentos; Acionamentos na indústria; Impacto de Acionamentos.

1. INTRODUÇÃO

O aumento constante de demanda industrial e tecnológica, faz com que ocorra cada vez mais a inserção de máquinas e produtos eletrônicos a fim de automatizar os sistemas de produção. Motores de Indução Trifásicos (MIT) representam a principal máquina capaz de converter energia elétrica em mecânica onde associam-se alta robustez e baixo custo. De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética a indústria é consumidora de 43,7 % da energia elétrica brasileira, e que os motores são responsáveis por 68 % desse consumo, a partir

desses dados, é possível ter dimensão do impacto desse consumo na qualidade da energia entregue.

Partindo do pressuposto de que o consumo citado tende ao seu crescimento, e considerando o efeito das correntes de partida do MIT nos diversos métodos de acionamentos, o presente trabalho tem como objetivo demonstrar os impactos gerados pelos acionamentos do MIT conforme o método de acionamento utilizado. Visa também avaliar a propagação desses impactos ao longo da rede de distribuição de baixa e média tensão.

A metodologia aqui aplicada visa descrever de forma didática, eficiente e concisa, os impactos da operação do MIT em situações reais das indústrias, tais como variações de

amplitude de tensão, valores máximos de corrente e queda de tensão considerando diversos métodos e condições de acionamento utilizando um ambiente de simulação e modelagem de uma planta industrial.

As caracterizações do MIT e métodos de acionamento foram realizadas por meio do desenvolvimento de uma bancada didática para acionamento e modelagem de um motor trifásico com rotor em gaiola de esquilo montado em laboratório.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Qualidade de Energia

Podem haver diferentes tipos de definição para qualidade de energia, depende do ponto de referência. A razão econômica é o principal motivo para a crescente preocupação com os parâmetros em qualidade de energia. A indústria, em busca de moderna automatização e produtividade, tem investido cada vez mais em equipamentos eletrônicos. (Fuchs; Masoum, 2008).

A popularização de equipamentos eletrônicos tem causado anormalidades no sistema de energia, as pluralidades desses fenômenos são em virtude de harmônicos decorrentes das cargas não lineares que possuem distorção na forma de onda de corrente e tensão. (Fuchs; Masoum, 2008).

Segundo Dugan (2012, p. 3), “qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou frequência que resulte em falha de operação de equipamentos de clientes” é caracterizado como falta de qualidade de energia elétrica.

A falta de qualidade de energia pode ser classificada de diversas maneiras, há diversas legislações para classificação desses distúrbios. Para ANSI C84.1, o tempo de duração do distúrbio é o mais importante, entretanto, a IEEE-519 considera a forma de onda, duração e magnitude, para caracterizar o evento. Para IEC, a frequência dos eventos é que o qualifica. (FUCHS; MASOUM, 2008).

Para regulamentação do setor elétrico e, a partir da Lei nº 9.427/1996 e do Decreto nº 2.335/1997, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi criada, sob jurisdição do Ministério de Minas e Energia (MME). Dentre suas competências, está a competência de fiscalizar o sistema. Para tal, foram elaborados os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) que, de acordo com seus objetivos, têm a função de normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2016). O PRODIST é dividido em módulos com diretrizes às diversas áreas das distribuidoras, onde o módulo 8 estabelece os critérios relacionados a qualidade de energia. Ele aborda não só a qualidade do produto, mas, também, do serviço prestado. Esse é o meio que a ANEEL impõe padrões para indicadores de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), no que diz respeito a valores de referência e perturbações na forma de onda.

O produto entregue pela concessionária, ou seja, tensão, não depende apenas da fonte alimentadora, mas, também, da carga conectada. As principais interações podem ser observadas na Tabela 1. No sistema alimentador, as principais perturbações estão relacionadas às distorções na

forma de onda da tensão, e as cargas tendem a distorcer a forma de onda de tensão e corrente. (Leão; Sampaio; Antunes, 2014).

Sistema → Carga	Carga → Sistema
Variações de tensão	Correntes harmônicas
Desequilíbrio de tensão	Corrente reativa
Harmônicos de tensão	Corrente Desbalanceada
Interrupção de tensão	Notches de tensão
Oscilações de tensão	Flutuação de tensão
Impulso de tensão	

Tabela 1. Relação Distúrbios entre Sistema e Carga

As cargas do sistema podem ser classificadas como lineares e não lineares, sendo que a primeira, não produz correntes distorcidas ao contrário da outra. As cargas não lineares produzem correntes distorcidas e resultam em uma queda de tensão distorcida através da impedância do sistema, e consequentemente na tensão dos demais pontos a jusante. Apesar da carga e sistema sofrerem influência recíproca, uma mesma carga instalada em pontos distintos da rede pode causar distúrbios distintos, também tendo influência dos equipamentos por ela alimentados. (Leão; Sampaio; Antunes, 2014).

As variações de tensão de curta duração (VTCD) são eventos significativos no valor eficaz, quando se tratando de amplitude em um intervalo inferior a 3 minutos. (PRODIST, 2017). A Tabela 2 mostra as diferentes classificações para variações de tensão com base na duração do desvio.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude V_{RMS} em relação à V_{REF}
Variação Momentânea de Tensão (V)	Interrupção	$t \leq 1$ s	$V < 0,1$ p.u.
	Afundamento	3 s $>$ $t \geq 1$ ciclo	$0,9$ p.u. $>$ $V \geq 0,1$ p.u.
	Elevação	3 s $>$ $t \geq 1$ ciclo	$V > 1,1$ p.u.
Variação Temporária de Tensão (V)	Interrupção	3 min $>$ $t > 3$ s	$V < 0,1$ p.u.
	Afundamento	3 min $>$ $t > 3$ s	$0,9$ p.u. $>$ $V \geq 0,1$ p.u.
	Elevação	3 min $>$ $t > 3$ s	$V > 1,1$ p.u.

Tabela 2. Classificação de VTCD

3. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo final deste trabalho foi realizado um trabalho, foi projetada e montada uma bancada didática em laboratório para levantamento de dados e aplicação em cenários de simulação. Para ilustrar as etapas do projeto a Figura 1 é apresentada.

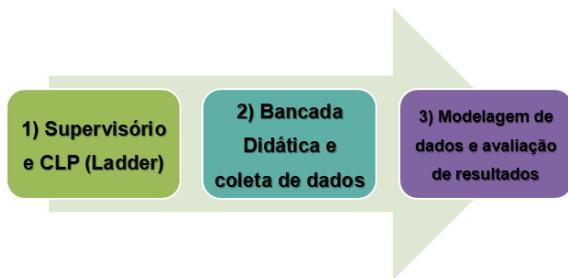


Figura 1. Etapas do projeto.

Para comando da bancada didática, foi desenvolvido o programa em linguagem Ladder utilizando o controlador lógico programável (CLP) do fabricante Altus, modelo QK801.

Sabendo que atualmente as fábricas estão cada vez mais automatizadas, foi desenvolvido de forma simplificada um sistema supervisório, no software Elipse E3, para controle da bancada. Na tela apresentada na Figura 2, é possível visualizar o resultado desta etapa. Nela está sendo representada de forma resumida o setor de uma fábrica para produção de ração animal. Cada motor apresentado no supervisório significa um método de acionamento na bancada didática, sendo possível operar de forma automática, ou seja, cada acionamento será ligado de forma sequencial temporizada, manual por meio de botoeiras ou botões no supervisório.

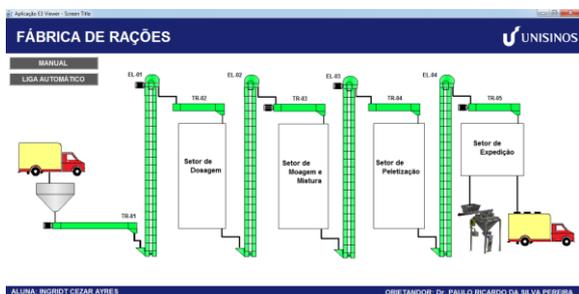


Figura 2. Supervisório Bancada Didática

A bancada didática é composta por cinco acionamentos: partida direta, estrela-triângulo, compensada, soft-starter e inversor de frequência. O propósito do desenvolvimento da bancada foi para a aquisição das curvas de corrente transitória e em regime permanente de cada um dos tipos dos acionamentos, para aplicação destas curvas em cenários de simulação. De forma alguma, mais de uma partida será acionada ao mesmo tempo, independentemente do modo de funcionamento, manual ou automático, havendo intertravamento lógico.

Para as medições de correntes transitórias foi utilizado osciloscópio e para obtenção dos dados em regime permanente foi utilizado o analisador de energia Fluke 435-II. A montagem final da bancada e as botoeiras para comando manual podem ser observadas na Figura 3.

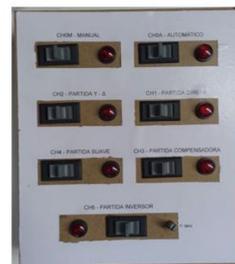


Figura 3. Bancada Didática Montada

Para simulação de carga no eixo do motor foi utilizado um freio de Foucault ou freio eletromagnético, que tem como princípio as correntes parasitas de Foucault. As correntes induzidas pelas bobinas passarão pelo disco ao serem energizadas com tensão contínua, nesse momento o disco é freado, pois um campo magnético está sendo induzido nele. O acoplamento mecânico é conectado ao eixo do motor. (SILVA, 2015). A força aplicada nas bobinas indutoras é medida por um dinamômetro. Na Figura 4, é apresentado o freio utilizado.

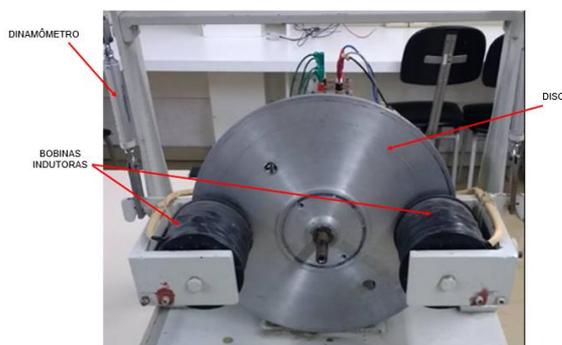


Figura 4. Freio de Foucault Utilizado

Arbitrou-se por cinco patamares percentuais de carga em função do conjugado nominal de 6,13 Nm do motor, variando de 0 % a 100 % com um degrau de 25 %.

A função single do osciloscópio proporciona o exato instante de tempo em que a corrente ultrapassa o valor de trigger parametrizado, neste caso 0 A.

Na Figura 5, tem-se como exemplo a onda da corrente na partida direta sem carga. Nela, pode-se observar que a corrente de pico na partida direta chega a 44 A o que é 12,9636 vezes maior que a corrente de pico em regime permanente de 3,3941 A, e 7,04 vezes o valor de pico da corrente nominal do motor.

Os dados capturados com o osciloscópio foram tratados e normalizados de modo a obter curvas típicas, que caracterizam cada método de partida empregado.

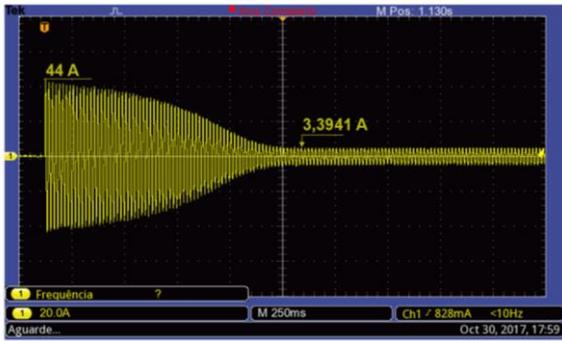


Figura 5. Imagem osciloscópio corrente partida direta sem carga

Na Figura 6, o traçado azul representa a reprodução no excel dos valores obtidos por meio do osciloscópio. Para as caracterizações das curvas típicas foram consideradas apenas os valores de amplitude, contabilizando o máximo valor de cada ciclo de senoide, correspondente ao intervalo de 16,67 ms, resultando na envoltória representativa da curva de acionamento do motor, indicada pelos pontos em preto. A corrente de base para normalização foi determinada como a própria corrente nominal de pico do MIT utilizado, neste caso, 6,25 A.

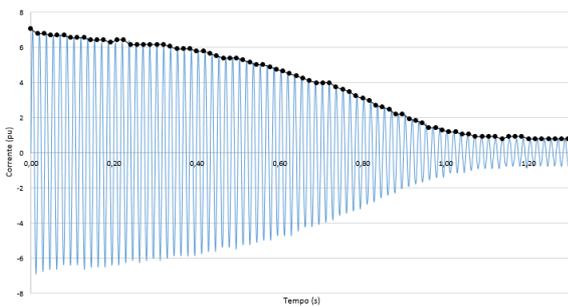


Figura 6. Corrente transitória partida direta sem carga – Fase R

Para melhor análise dos dados, todos os gráficos foram gerados pela corrente nominal em p.u., o mesmo que a relação da corrente de partida pela corrente nominal, dado apresentado na placa do motor. De forma geral, é possível observar um comparativo entre as partidas a partir da análise das curvas típicas normalizadas, onde na Figura 7 são apresentadas as curvas sem carga aplicada no eixo do motor e na Figura 8 representadas as curvas com a carga nominal conectada.

As curvas típicas, criadas para partidas a vazio e em diferentes níveis de carregamento foram incorporadas ao OpenDSS disponibilizadas para a utilização no modelo da planta industrial em análise.

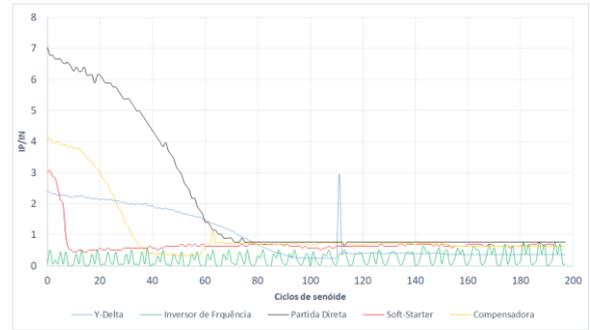


Figura 7. Comparativo corrente transitória entre acionamento com nível de carga de 0 %

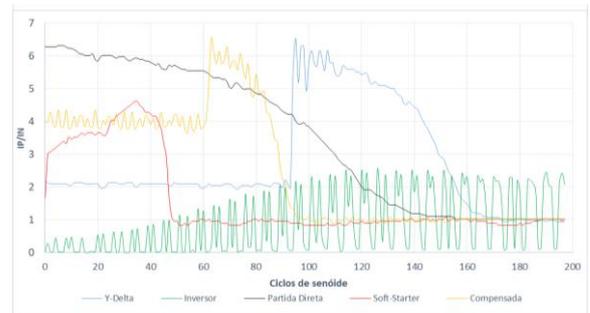


Figura 8. Comparativo corrente transitória entre acionamento e níveis de carga

4. SIMULAÇÃO DOS DADOS EM UMA PLANTA INDUSTRIAL

4.1 Contextualização

Para o ano de 2017, houve uma projeção de produção de 69,4 toneladas de rações, dentre todos os setores, como aves, gado, suínos, cães, gatos, equinos, aquicultura e outros. (SINDIRAÇÕES, 2017).

Devido ao crescimento constante do agronegócio, a produção de ração, premixes e suplementos para animais e a preocupação com a qualidade da sua produção tem feito com que as fábricas de rações invistam cada vez mais em automatização e rastreamento do processo produtivo.

Os equipamentos de aplicação geral no processo independente da etapa são elevadores, transportadores e silos. Após a dosagem dos ingredientes, no setor de moagem e mistura, é possível destacar uma gama maior de equipamentos como o moinho e o misturador, principalmente. Algumas rações têm a necessidade de peletização, que consiste em transformar produtos farelados em grânulos. Para isso, a ração passa por uma peletizadora e logo por um triturador. A expedição dos produtos pode se dar por intermédio de caminhões graneleiros ou sacarias.

4.2 Adaptação do Caso Real

A planta fabril modelada representa uma fábrica real de rações situada no Rio Grande do Sul e possui três subestações com uma alimentação de 25 kV. Em sua rede de baixa tensão, estão conectados 163 motores trifásicos. Pequenos motores, quando analisados individualmente, não causam impactos

significativos, quando em comparação aos de maior porte. Por esse motivo, eles foram agrupados em blocos de cargas, conforme sua potência e tipo de acionamento. Dessa forma, foram criados 30 grupos de cargas. O diagrama unifilar gerado é apresentado na Figura 9.

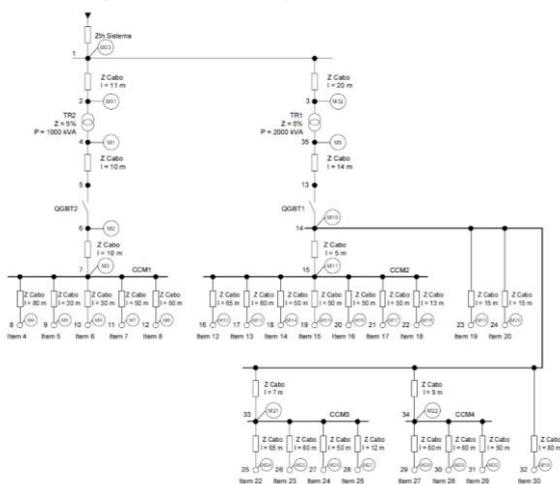


Figura 9. Diagrama Unifilar Planta Industrial para Simulação

A partir do conhecimento do regime de operação da planta industrial utilizada, foi gerada uma sequência de funcionamento para os grupos de cargas, e foi adaptado para a forma de análise do presente trabalho, que foi realizada em forma de ciclos de senoides. Conforme o comportamento das curvas de cargas e sua duração em termos de ciclos de senoides foi gerado uma linha do tempo de 201 ciclos para simulação, para instantes de ligamento e desligamento dos grupos de cargas e os pontos de maiores impactos foram analisados. Na Figura 10, é representada a linha do tempo para a simulação gerada.

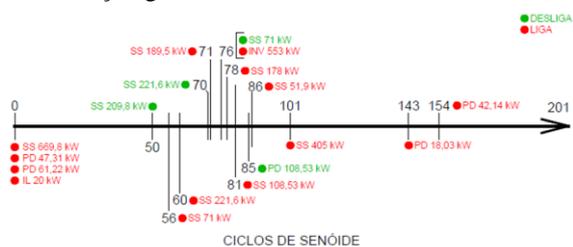


Figura 10. Linha do tempo do cenário de simulação

A Tabela 3 apresenta o número de ciclos de senoides em que cada carga liga, desliga e o número de ciclos em que permanece acionada.

Item	Tempo de Operação (Ciclos de senoides)	
	Partida	Desligamento
4	0	85
5	0	50
6	0	RP
7	0	RP
8	0	50
12	0	85
13	60	70

14	56	76
15	78	RP
16	71	RP
17	71	RP
18	71	RP
19	76	RP
20	76	RP
22	154	RP
23	81	RP
24	76	RP
25	100	RP
27	143	RP
28	86	RP
29	86	RP
30	RP	RP

Tabela 3. Cenário de simulação

O termo RP refere-se ao regime permanente, sendo considerado que o motor já se encontra em operação ou que assim permanecerá até o final da simulação.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados os principais resultados desse trabalho, sendo divididos em dois blocos principais. No primeiro é apresentada uma avaliação das curvas típicas de partida, comparando os métodos e os diferentes níveis de carregamento. No segundo é avaliada a simulação da planta industrial, considerando a propagação das variações de tensão de curta duração causadas pelas partidas dos motores em diferentes pontos da planta.

5.1 Métodos de Acionamento

O momento de inércia é a reação que um corpo oferece a outro a qualquer alteração em seu movimento de rotação em seu eixo. No contexto de motores elétricos, o momento de inércia total é a soma do momento da carga e do motor. Sendo assim, quanto maior o percentual de carga aplicado no eixo do motor, maior é o tempo para estabilização da corrente de partida.

A partida estrela-triângulo apresentou uma corrente de partida de, aproximadamente, três vezes a nominal do motor. Como a tensão aplicada nas bobinas do motor é de, aproximadamente 58 %, o seu conjugado de partida também é reduzido, e aconselha-se sua utilização quando os motores forem partir a vazio. Para que a utilização da partida estrela triângulo seja válida, o motor deve atingir 90 % da sua velocidade nominal, caso contrário, ao realizar a comutação da ligação estrela para ligação delta, a corrente de partida chega próximo aos valores de pico da corrente de partida direta. É possível observar esse evento quando se introduz uma carga com conjugado igual ou superior a 50 % do valor nominal do motor de 6,13 Nm. Como o motor está com a tensão reduzida nos seus terminais, o motor não tem um conjugado de partida suficiente para atingir a velocidade necessária para esse tipo de partida. As curvas para cargas de 50 % e 75 % do conjugado nominal apresentam o mesmo

pico de corrente no momento da comutação de estrela para triângulo.

Assim como na partida estrela-triângulo, a tensão na bobina do motor é reduzida e, conseqüentemente, seu conjugado de partida também é reduzido. Quando há a comutação para retirada do autotransformador para a rede de alimentação direta, há um pico de corrente que chega muito próximo ao comportamento da partida direta, não justificando a utilização de um autotransformador. O TAP utilizado no levantamento da curva foi de 65 % da tensão nominal. No momento da partida, a corrente de pico apresentada varia entre 3,2209 pu até 4,1595 pu.

A partida suave é a aplicação da tensão de linha de forma gradativa até seu valor nominal. Assim como em qualquer partida que reduz a tensão nas bobinas do motor, a partida suave também apresenta um conjugado de partida baixo e a aplicação dela é mais efetiva quando partida com o motor a vazio. A partir do percentual de carga de 50 %, o motor apresentou sobreaquecimento, visto que com uma tensão baixa nos enrolamentos, o rotor do motor ficava travado até que a tensão aplicada chega ao seu valor nominal. O motor não pode sofrer constantes ligamentos e desligamentos quando acionado com carga, pois somando o seu aquecimento normal de funcionamento e adicionando o seu aquecimento no ligamento a Soft-Starter visualiza como uma sobrecarga desligamento o MIT. O tempo para estabilização da corrente de partida apresentada pelo Soft-Starter é curto quando comparado com a partida direta.

O uso de inversores de frequência causa grandes distorções de corrente na rede e grandes distorções de tensão no MIT. O inversor de frequência gera uma distorção da forma de corrente e seu alto nível de distorção harmônica total é elevado.

5.2 Planta Industrial

No TR1, são ligados 669,8 kW com perfil de carga de soft-starter e 47,31 kW com perfil de carga de partida direta. No TR2, já está ligada a carga de iluminação de 20 kW e são ligados 61,22 kW com perfil de carga de partida direta. Todas as análises são realizadas com base na tensão de linha da planta. Em média tensão, a tensão de linha é 13,34 kV e em baixa tensão é de 220 V.

Na Figura 11, são apresentados os pontos com maiores alterações. Todas as partidas apresentaram, no seu momento de partida, um afundamento de tensão.

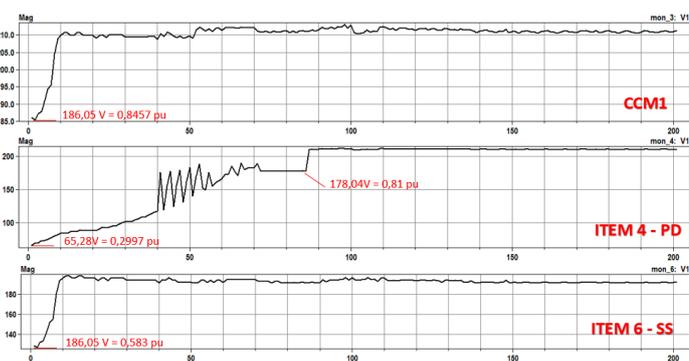


Figura 11. Cenário de simulação no TR1

Os acionamentos, utilizando soft-starter, tiveram sua tensão estabilizada após 9 ciclos. Porém, as partidas utilizando acionamento direto não apresentaram estabilização na sua tensão nominal até o ciclo 85, onde foram desligadas; esse momento deveria ocorrer no ciclo 77, conforme a curva de carga da partida.

Os pontos de maior variação na subestação um, pode ser observado na Figura 12, onde se observa uma variação constante na forma de onda, a partir do instante em que os motores de grande porte com perfil de carga com inversor de frequência são acionados.

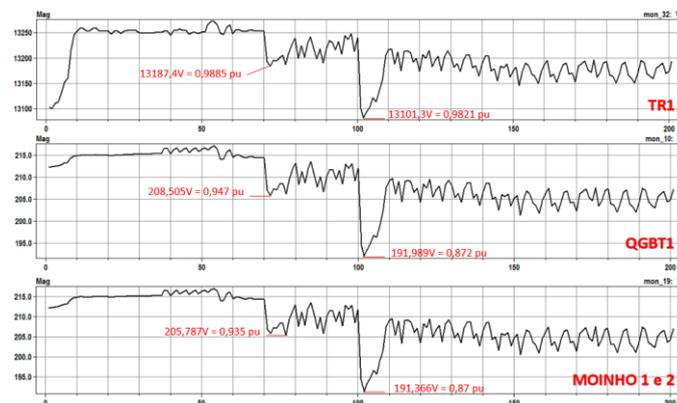


Figura 12. Cenário de simulação no TR2

O maior motor instalado na planta de 405 kW, é acionado com soft-starter, e o seu acionamento causou um afundamento momentâneo de tensão ao longo de toda a rede de baixa tensão do transformador 01. Na Figura 13, são apresentados o comportamento da tensão e da corrente no instante em que o motor é ligado.

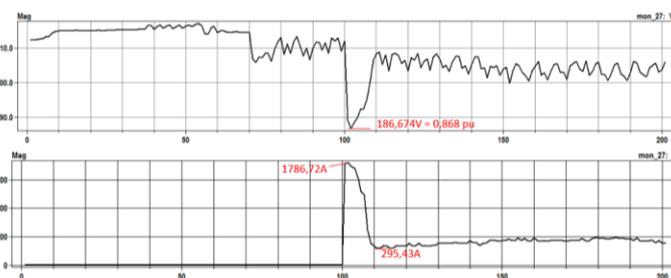


Figura 13. Cenário de simulação motor de 405 kW

As estratificações dos parâmetros foram realizadas em termos de amplitude de ocorrências ao longo do período analisado. É possível perceber que a tensão apresenta um comportamento satisfatório nos principais ramais de alimentação das cargas dentro do valor de referência de 10%, apresentando uma variação de 5 % em sua grande maioria. As tensões nas cargas apresentaram oscilações de impacto significativo no instante de suas partidas, porém após o tempo de estabilização da corrente de partida elas tiveram seu comportamento normalizado.

Em todos os ciclos analisados houve uma média de 51 % para variações de 0,95 p.u. a 1 p.u., e uma média de 37 % para

variações de 0,90 p.u. a 0,95 p.u. apresentando um comportamento satisfatório.

5 CONCLUSÕES

Os objetivos principais deste trabalho foram demonstrar os impactos gerados pelos acionamentos do MIT e avaliar a propagação desses impactos ao longo da rede de distribuição de baixa e média tensão. Através do desenvolvimento de uma bancada didática foi possível realizar o levantamento das curvas características da corrente transitória na partida de motores de indução trifásico, quando operando com diferentes níveis de cargas e modelar seu comportamento através de curvas representativas em uma ferramenta computacional de análise de fluxo de potência. A ferramenta OpenDSS, amplamente utilizada pelas distribuidoras de energia, se mostrou adequada também para a modelagem de sistemas industriais, possibilitando uma avaliação da propagação de distúrbios ao longo da planta, entre outras análises como nível de perdas, tensão, fluxo de reativos entre outros.

Para determinar o método de acionamento mais adequado, é preciso conhecer a aplicação do equipamento, comportamento e exigência quanto ao nível de carga empregado no momento da partida, espaço e custo disponível para instalação da chave de partida. Dando ênfase ao perfil da carga, visto que se comprovou que ele afeta diretamente a determinação no método mais adequado para acionamento.

O resultado geral do trabalho comprovou a noção inicial, de que o acionamento de motores de indução trifásico causa afundamentos de tensão na rede de distribuição secundária mesmo que momentâneos, afetando a qualidade de energia elétrica.

Fica de fato evidenciado a importância deste trabalho, visto que os motores de indução trifásicos são predominantes quando analisados as aplicações industriais. Demonstra a viabilidade da aplicação da metodologia, podendo-se gerar novas curvas típicas caracterizando novos grupos de motores por faixa de potência e tipos de ligação com medições na planta industrial ampliando a base de curvas típicas.

Referindo-se a qualidade de energia, verifica-se um maior rigor na legislação para controle do produto entregue pelas distribuidoras, porém a preocupação dos fabricantes de equipamentos também vem crescendo, por consciência dos impactos gerados e como referência para vendas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA.
<http://www.aneel.gov.br/a-aneel>. Acesso em: 21 de outubro de 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA.
<http://www.aneel.gov.br/prodist>. Acesso em: 21 de outubro de 2016.
- DUGAN, Roger C. et al. Electrical power systems quality. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012. xvii, 558 p.

- RASHID, MUHAMMAD H. (1998). Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações. 3.ed. São Paulo, SP: Makron – Hill.
- RUTH, LEÃO; SAMPAIO, RAIMUNDO F.; ANTUNES, FERNANDO L. M. (2014) Harmônicos em sistemas elétricos. 1. ed.. Rio de Janeiro: Elsevier, 347p.
- SILVA, G. M. B. Freio Eletrodinamométrico Usando um Inversor de Frequência e um Motor de Indução Trifásico. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, SP, 2015.
- SINDIRAÇÕES, Boletim Informativo.
http://sindiracoes.org.br/wp-content/uploads/2017/05/boletim_informativo_do_setor_mai_2017_vs_final_port_sindiracoes.pdf. Acesso em: 17 de setembro de 2017.
- SOUZA, M. M. P (2010). Modelagem de Cargas para Estudos Dinâmicos. Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Itabujá. Itabujá, MG, 2010
- WEBER, D. L. (2015) Impacto da Conexão de Cargas Não Lineares em Sistemas de Distribuição de Energia. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Elétrica (Universidade do Vale do Rio dos Sinos). São Leopoldo, RS.