

## MODELAGEM DE DISPOSITIVOS DE PARTIDA ELETRÔNICA PARA ANÁLISE DA EMISSÃO DE HARMÔNICOS

LUANA LUCIANY GONCALVES SILVA<sup>1</sup>, PABLO JULIO COELHO DE LIMA<sup>2</sup>, VIVIAN LOHANNE DO NASCIMENTO FERREIRA<sup>3</sup>, DANIEL SOUSA DE SENA<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Estudante de Graduação, Engenharia de Telecomunicações, UFPA, Belém-PA, luana.luciane@hotmail.com;

<sup>2</sup> Estudante de Graduação, Engenharia Elétrica, UFPA, Belém-PA, pablo.jcoelho@gmail.com;

<sup>3</sup> Estudante de Graduação, Engenharia Elétrica, UFPA, Belém-PA, vivianlohanne03@gmail.com;

<sup>4</sup> Estudante de Graduação, Engenharia Elétrica, UFPA, Belém-PA, danielsenaletronica@gmail.com.

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
15 a 17 de setembro de 2021

**RESUMO:** O presente trabalho tem por objetivo modelar e simular dispositivos de partida eletrônicos para motores de indução trifásicos (MITs), tendo como exemplos os métodos *soft-starter* e o inversor de frequência, a fim de serem observados os fenômenos de propagação de distorções harmônicas na rede elétrica, devido ao uso dos MITs. Para tanto, foram utilizados os *softwares*, ATPDraw (*Alternative Transient Program*), para modelagem dos dispositivos de partida e do motor, além do ambiente MATLAB para analisar os espectros harmônicos dos dados gerados pela simulação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Motor de Indução, Soft-Starter, Inversor de Frequência, ATPDraw e MATLAB.

### MODELING OF ELECTRONIC STARTING DEVICES FOR ANALYSIS OF THE EMISSION OF HARMONICS

**ABSTRACT:** The present work aims to model and simulate electronic starting devices for three-phase induction motors (MITs), taking as an example the soft-starter and frequency inverter methods, in order to observe the phenomena of harmonic distortion propagation in the network electrical, due to the use of MITs. For this, the software, ATPDraw (*Alternative Transient Program*), was used to model the starting devices and the motor, in addition to the MATLAB environment to analyze the harmonic spectra of the data generated by the simulation.

**KEYWORDS:** Induction Motor, Soft-Starter, Frequency Inverter, ATPDraw and MATLAB.

### INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos (MITs), são dispositivos em corrente alternada (AC), amplamente utilizados nas atividades industriais e na construção civil, como os empregados em esteiras de produção e em elevadores. Os MITs possuem vantagens que justificam sua grande atuação no cenário mundial, tais como: fácil construção e manutenção. No entanto, o funcionamento desse tipo de motor requer da rede uma alta corrente inicial para vencer a inércia do seu eixo, o que pode causar complicações, como queda de tensão na rede. A partir disso, faz-se necessário a utilização de métodos de partida que possam reduzir a necessidade de uma elevada corrente, por exemplo, o *soft-starter* e o inversor de frequência, os quais foram modelados e simulados no *software* ATPDraw. Porém, tais métodos provocam a injeção de correntes harmônicas na rede, afetando diretamente a qualidade da energia elétrica, ou seja, a presença de harmônicos nas redes elétricas pode acarretar sobreaquecimento e diminuição da vida útil de equipamentos sensíveis a esse tipo de distúrbio.

### MODELAGEM COMPUTACIONAL

A partir do estudo do funcionamento da máquina de indução e dos dispositivos de partidas, estes foram modelados com componentes padrão da biblioteca do ATPDraw.

O primeiro passo para a simulação é a modelagem da carga acionada pelo dispositivo eletrônico, o motor de indução, cujos dados estão presentes na Tabela 1. O ATPDraw apresenta em sua biblioteca o modelo UM3 (*Universal Machine – Type 3*), para este dispositivo são necessários os parâmetros mecânicos da máquina: torque, perdas por atrito e momento de inércia, que são modelados, respectivamente, por fonte de corrente, resistência elétrica e capacitância. A seguir são mostrados o modelo e a corrente obtida na simulação.

Figura 1. Motor de indução e corrente simulados no ATPDraw.

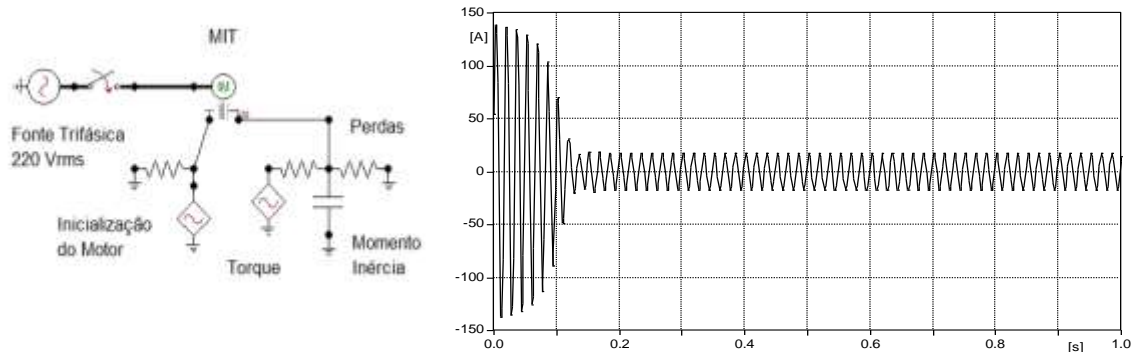


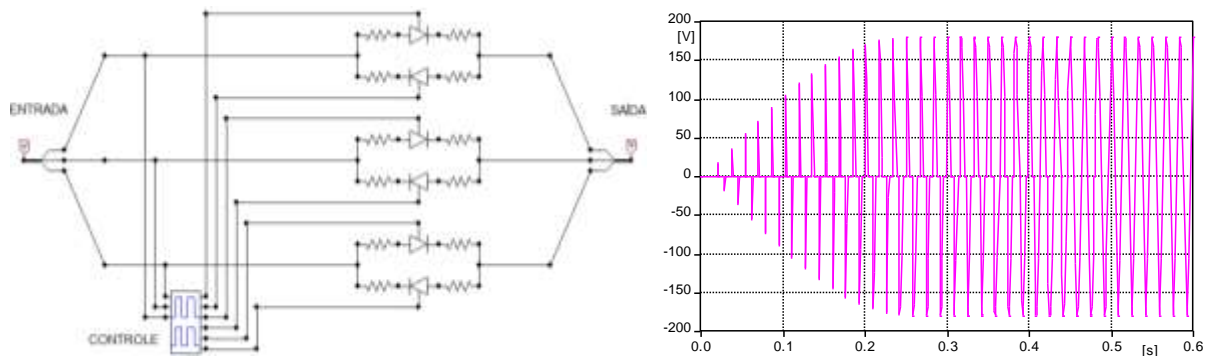
Tabela 1. Dados do Motor de Indução

MIT – Uso Geral	
<b>Potência</b>	<b>5 [CV]</b>
<b>Tensão</b>	<b>220 [V]</b>
<b>Corrente</b>	<b>12,7 [A]</b>
<b>Frequência</b>	<b>60 [Hz]</b>
<b>Ip/In</b>	<b>8,3</b>
<b>Fator de Potência</b>	<b>0,83</b>
<b>Rendimento</b>	<b>0,8</b>
<b>Velocidade</b>	<b>3515 [RPM]</b>
<b>Torque</b>	<b>10,1 [N.m]</b>
<b>Momento de Inércia</b>	<b>0,007 [kg.m<sup>2</sup>]</b>

Para mitigação do efeito transitório de alta corrente de partida são empregados os métodos de partida indireta que diminuem o valor da tensão aplicada ao motor nos instantes iniciais, diminuindo, assim, a corrente inicial. Dentre eles estão o *soft-starter* e inversor de frequência, cuja explanação da modelagem é feita nos parágrafos seguintes.

Os *soft-starters* são equipamentos utilizados para acelerar e desacelerar suavemente os motores de indução, controlando a tensão de alimentação aplicada ao motor através de um par de SCRs (do inglês Silicon controlled Rectifier – Retificador Controlado de Silício) ou tiristores, compondo o circuito de potência, conectados em série cada fase e em antiparalelo entre si. Variando-se o ângulo de disparo é possível controlar o valor eficaz da tensão e consequentemente a corrente. Dessa forma, é possível fornecer, gradativamente, tensão ao motor durante a partida, “Partida Suave”, evitando picos de corrente na rede e quedas de tensão na mesma.

Figura 2 – Modelo de *Soft- Starter* e forma de onda da tensão no ATP.

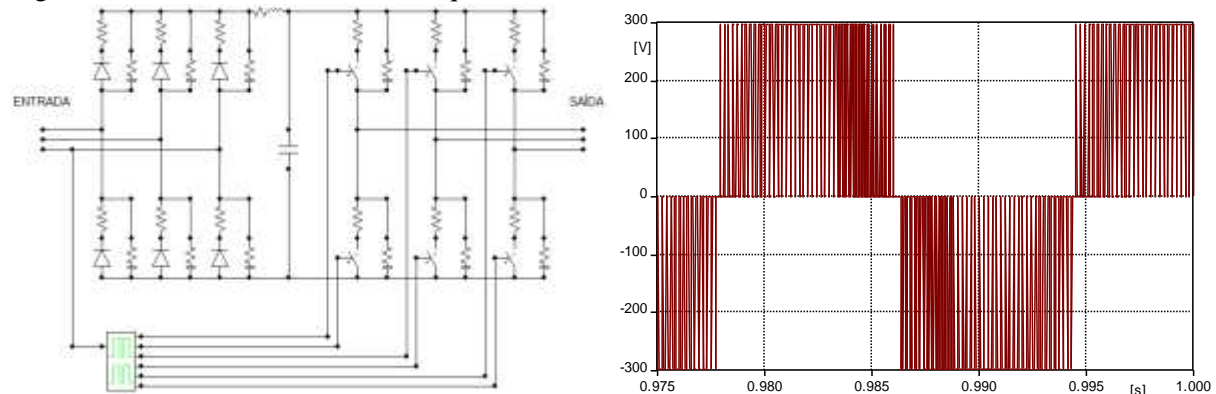


A Figura 2 mostra o dispositivo de partida suave desenvolvido na plataforma ATPDraw. Para o controle dos ângulos de disparo dos tiristores foi necessário um algoritmo em linguagem MODELS, plataforma disponível no ATPDraw, para elaboração de lógicas de programação capaz de suportar a modelagem de controles necessários para variadas aplicações, através da definição de entradas e saídas.

A lógica de controle consiste na inicialização de variáveis escolhidas pelo usuário, como o ângulo de disparo inicial (Alfa) e o tempo de partida ( $T_p$ ), em seguida é calculado o decremento do ângulo de disparo ( $D_{cr}$ ), este dependente das variáveis Alfa e  $T_p$ , e a cada ciclo de onda o ângulo de disparo é subtraído de  $D_{cr}$ , fazendo com que o valor eficaz da tensão seja fornecido gradativamente ao motor.

Para a modelagem do inversor de frequência são necessários 3 estágios: o retificador, responsável por converter a tensão alternada da rede em contínua; o elo CC, filtro capacitivo que mantém a *ripple* de tensão; o inversor, composto por transistores, e capaz de sintetizar um sinal variável em amplitude e frequência, e por fim o bloco de controle com lógica PWM (do inglês Pulse Width Modulation – Modulação por largura de pulso).

Figura 3 – Modelo de inversor de frequência e forma de onda da tensão no ATP.



A Figura 3 mostra as partes constituintes do inversor modelado no ATPDraw, com lógica de controle SPWM (Modulação por Largura de Pulso Senoidal), escolhida por estar presente em inversores comerciais. A modulação SPWM consiste na comparação de uma onda triangular (portadora) e uma onda de referência (moduladora) para geração de pulsos.

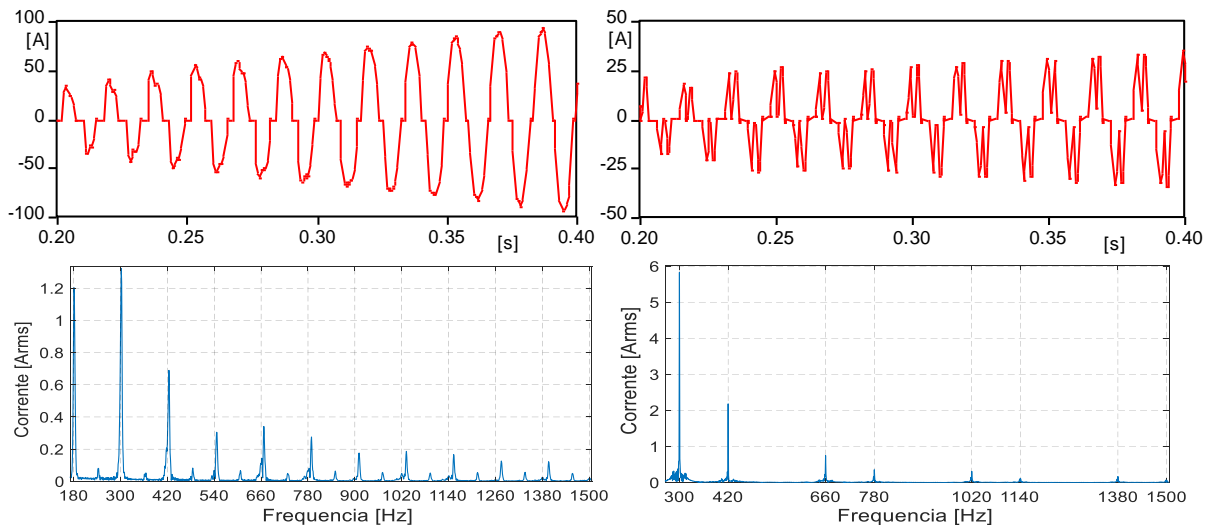
A lógica para controle do inversor consiste na entrada da frequência de chaveamento ( $F_{ch}$ ) e da tensão inicial de partida ( $V_i$ ), definidas pelo usuário, a onda de referência cresce em amplitude e em frequência gerando assim pulsos diferentes na saída que reproduzem o sinal desejado, até que se chegue na tensão e frequência nominal de operação do motor.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao término da modelagem e da simulação, as correntes obtidas foram exportadas para o programa MATLAB para a realização da Transformada de Fourier (FT), ferramenta matemática consagrada na análise e processamento de sinais, que de forma sucinta transforma um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, sendo possível verificar quais são as componentes de

frequência que compõe o sinal. A seguir, são dados mais detalhes dos resultados obtidos via Transformada de Fourier, para tal, o *soft-starter* foi configurado com ângulo de disparo inicial de  $160^\circ$ , e o inversor de frequência configurado com frequência de chaveamento de 5 kHz e tensão inicial de 10% da tensão nominal, e ambos com tempo de partida de 0,5 s.

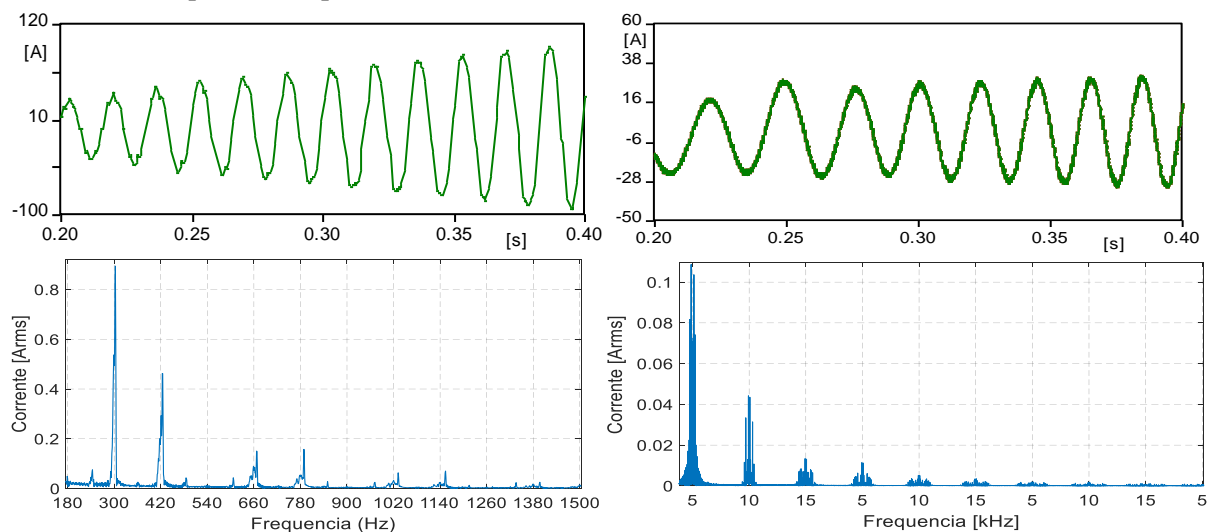
Figura 4 – Formas de ondas e espectros harmônicos das correntes nas entradas do *soft-starter* e do inversor de frequência, respectivamente.



As figuras acima confirmam que o motor de indução quando alimentado por dispositivos de partida eletrônicos, se comporta como uma carga não linear visto pela rede de alimentação.

A distorção harmônica que mais contribui para deformação na forma de onda consumida pelo *soft-starter* são os harmônicos de ordem ímpar  $3^\circ, 5^\circ, 7^\circ$  e assim por diante, com amplitude decrescente a medida que a ordem aumenta. Quando é observado o espectro harmônico do inversor de frequência, percebe-se que as frequências múltiplas de 3 não estão presentes, as outras ordens aumentaram em magnitude, onde podem ser encontradas  $5^\circ, 7^\circ, 11^\circ$  e  $13^\circ$  harmônicas com amplitudes maiores.

Figura 5 – Formas de ondas e espectros harmônicos das correntes nas saídas do *soft-starter* e do inversor de frequência, respectivamente.



Na Figura 5, percebe-se que, no lado do motor as frequências harmônicas foram atenuadas e outras podem ser consideradas desprezíveis como a  $3^\circ$  harmônica e seus múltiplos. No caso do inversor de frequência, agora o que predomina são as frequências múltiplas da frequência de chaveamento, enquanto que o *soft-starter* continua com distorções de ordem ímpares, porém

atenuadas, com exceção do 3º harmônico e seus múltiplos que podem ser consideradas desprezíveis. Tal fenômeno mostra que a alimentação do motor também fica comprometida, pois sem a alimentação puramente senoidal, este jamais funcionará em regime nominal comprometendo sua utilização.

## CONCLUSÃO

O presente artigo apresentou a modelagem computacional de dois equipamentos baseados na eletrônica de potência, utilizados para o acionamento de motores de indução trifásicos, para simulação e obtenção das correntes consumidas pelos mesmos, afim de serem observados seus espectros harmônicos, no lado da rede e no lado da carga (motor). Estes modelos computacionais reproduziram bem o fenômeno de emissão de harmônicos já presente na literatura, validando assim as simulações computacionais como forma de estudos opcionais quando o sistema elétrico é de tal maneira complexo e de difícil acesso.

Vale ressaltar que quando se trabalha com simulações, os resultados nunca reproduzem totalmente a prática, devido a ruídos externos e imperfeições nos materiais que constituem os equipamentos, as medições contém dados aleatórios impossíveis de serem ponderados e modelados computacionalmente.

Por fim, este estudo possibilitou o desenvolvimento de módulos de partidas eletrônicos, *soft-starter* e inversor de frequência, capazes de serem simulados em diferentes situações de projetos, possibilitando prever vários cenários na prática.

## REFERÊNCIAS

- Chaves, M. L. R.; Rodrigues A. R. e Rodrigues, J. F.. Implementação de um Modulo para Simulação de um Inversor PWM no Software ATPDraw Utilizando a Rotina TACS. IV Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL). Uberlândia, MG. 2005.
- Da Silva, W.G; De Freitas, M. A. A.; Kopcak I. Correntes harmônicas causadas pelo motor de indução alimentado por inversor de frequência no contexto das recomendações da norma IEEE STANDARD 519-92. XI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL). Uberlândia, MG. 2013.
- Mota D. Á. e Chaves, M. L. R.. Modelagem de um Dispositivo de Partida Suave para Motores de Indução Trifásicos no Programa ATP. V Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL). Uberlândia, MG. 2007.
- Souza, V. F. Análise dos Modelos de Máquinas de Indução para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos de Potência e sua Representação no Programa de Simulação ATP. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2014.
- Zappelini, A. B. Análise de Eficiência energética em sistemas de ar comprimido. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2008.