

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO



FERNANDO GABLER SMIDERLE

**ESTUDO SOBRE A COMPENSAÇÃO DINÂMICA DE REATIVOS NA PARTIDA
DOS MOTORES DE INDUÇÃO DE ROTOR GAIOLA**

Vitória – ES
JANEIRO/2018

FERNANDO GABLER SMIDERLE

**ESTUDO SOBRE A COMPENSAÇÃO DINÂMICA DE REATIVOS NA PARTIDA
DOS MOTORES DE INDUÇÃO DE ROTOR GAIOLA**

Parte manuscrita do projeto de graduação do aluno **Fernando Gabler Smiderle**, apresentada ao departamento de engenharia elétrica do centro tecnológico da universidade federal do espírito santo, como requisito parcial para aprovação na disciplina “ELE08553 – Projeto de graduação II”.

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Orientador

Prof Dr. Paulo José Mello Menegáz
Examinador

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Examinador

Vitória – ES
JANEIRO/2018

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas passaram pela minha vida e de alguma maneira conseguiram imortalizar suas lembranças em minha memória, mas algumas pessoas ao invés de deixar apenas lembranças, me ajudaram a escrever capítulos inteiros sobre minha vida mudando completamente o meu mundo. Eu sou grato a todas essas pessoas por ajudarem a me tornar esse homem maravilhoso que eu sou hoje.

Eu acredito que Deus está sempre comigo e sempre esteve desde o início da minha vida, é muito difícil explicar, é como se todas as coisas que aconteceram e que estão acontecendo de alguma forma se conectassem tendendo a realização de meus sonhos, coisas que os mais céticos poderiam dizer que é muita sorte. Eu acredito nisso, pois houveram momentos notáveis em que sua presença foi tão forte que é impossível duvidar que ele estivesse literalmente ali comigo com suas mãos em meu ombro me ajudando. Obrigado por tudo Deus, prometo que vou tentar te dar menos trabalho a partir de agora.

A Primeira pessoa que eu devo agradecer é o meu pai, seu nome é Aloyr Rogério Smiderle. Força de vontade inabalável, Senso de justiça, honestidade, moral, ética, auto aperfeiçoamento... eu posso dizer com certeza que tudo que eu me tornei hoje foi na tentativa de me tornar igual a esse homem. Eu tenho muito orgulho de ser quem eu sou hoje e tenho muito orgulho do meu pai, meu farol.

Por ordem cronológica a segunda pessoa que eu devo agradecer é a um antigo grande amor, o seu nome é Morgana Moreschi. Eu certamente só consegui ingressar na faculdade naquele momento da minha vida por ela acreditar que eu era capaz e ela foi a única que acreditou. Essa mulher acompanhou as datas do processo seletivo e insistiu para que eu me inscrevesse do primeiro até o ultimo dia de inscrição. Quando no último dia de inscrição ela descobriu que eu ainda não havia feito meu cadastro, ela me obrigou a fazê-lo. Aquela aprovação foi certamente um dos dias mais felizes da minha vida e eu devo grande parte disso a ela. Eu fui muito sortudo por ter “esquecido” em casa o meu guarda-chuva naquele dia chuvoso.

Logo em seguida vem o meu irmão, seu nome é Rafael Gabler Smiderle. Apesar de que entrar para a faculdade era um sonho de criança, nem tudo foi alegria após a conquista. Naquele momento da minha vida tudo mudou, eu passei de bom vivant para novamente ser o rapaz das salas de aula, o grande problema disso foi que como eu sempre estudei em período integral eu perdi minha fonte de renda e voltei a ser sustentado pela minha família. Somente sendo um homem de verdade para entender o sofrimento que é isso. Nesse momento da minha vida o que aliviou meu sofrimento foi meu irmão mais novo ter assumido parte das responsabilidades da casa em meu lugar. Para eu realizar meu sonho, muito suor e sangue foram derramados, o que meu irmão fez jamais será esquecido.

E para finalizar eu gostaria de agradecer muito a minha mãe, seu nome é Iracema Maria Gabler. No mundo não tem guerreira maior, suportou tudo que era possível e impossível ao meu lado, sempre se dedicando a realização do meu sonho. Minha mãe é minha torcedora número 1, me incentivou sempre e nunca duvidou de mim, isso foi fundamental para eu me manter focado. Superamos muitas coisas juntos para eu chegar até aqui, tantas que eu dedico metade desse diploma a ela, obrigado mãe.

A todas as outras pessoas que não foram citadas e que de alguma forma me ajudaram um sincero obrigado.

RESUMO

Este projeto de graduação apresenta um estudo sobre compensadores dinâmicos de reativos para operar no momento do acionamento de motores de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola. O objetivo é minimizar os efeitos causados na rede pelo acionamento dos motores de indução trifásicos através de uma abordagem diferente dos métodos convencionais.

Por organização esse trabalho pode ser dividido em três blocos: primeiramente é feita uma introdução sobre problema, destacando as características relevantes das máquinas de indução trifásicas no tocante à sua corrente de partida e fator de potência e, além disso, falando também dos problemas relacionados ao baixo fator de potência. Em seguida é feita uma análise superficial sobre as soluções mais relevantes disponíveis no mercado, incluindo o compensador síncrono. Para finalizar o trabalho foi realizado um estudo sobre o funcionamento do motor de indução trifásico em conjunto com o compensador síncrono e, completando essa parte final, foi realizada a conclusão comparando o compensador síncrono com as outras tecnologias vistas nesse mesmo trabalho.

Palavras chave: Compensador dinâmico de reativos, afundamento de tensão, acionamento de motores de indução trifásicos

ABSTRACT

This graduate project presents a study on dynamic reactive compensators to operate at the time of to trigger three-phase induction motors with cage rotor. The objective is to minimize the effects caused in the network by the activation of three-phase induction motors through a different approach than conventional methods.

By organization this work can be divided into three blocks: Firstly, an introduction about the problem is made, highlighting the relevant characteristics of three-phase induction machines with respect to their starting current and power factor and, in addition, low power factor. Then a superficial analysis is made on the most relevant solutions available in the market, including the synchronous compensator. In order to finalize the project, a study was carried out on the operation of the three-phase induction motor together with the synchronous compensator and, completing this final part, the conclusion was made comparing the synchronous compensator with the other technologies seen in the same project.

Keywords: Dynamic reactive compensator, voltage sag, motor drive

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Circuito equivalente do motor de indução trifásico.....	3
Figura 2	– Circuito equivalente de Thevenin do motor de indução trifásico	5
Figura 3	– Exemplo de curva de conjugado x escorregamento de um motor de indução.....	6
Figura 4	– Exemplo de curva de conjugado e corrente em cima e abaixo o fator de potência, todos em função da velocidade em Rpm.....	8
Figura 5	– Ilustração de como obter R1 através dos enrolamentos do estator.....	10
Figura 6	– Esquema de montagem dos medidores para o ensaio a vazio.....	11
Figura 7	– Esquema de ligação para partida direta.....	16
Figura 8	– Demonstração dos efeitos provados pela mudança de tensão usando o método de partida direta.....	18
Figura 9	– Esquema de ligação para partida usando uma chave estrela-triângulo.....	19
Figura 10	– Demonstração dos efeitos provados pela mudança de tensão usando o método de partida com chave estrela-triângulo.....	21
Figura 11	– Esquema de ligação para partida usando uma chave compensadora.....	22
Figura 12	– Demonstração dos efeitos provados pela mudança de tensão usando o método de partida com chave compensadora.....	23
Figura 13	– Curva de tensão em rampa na saída do soft-starter.....	24
Figura 14	– Esquema genérico de um soft-starter.....	25
Figura 15	– Tensão senoidal chaveada por tiristor aplicada ao motor.....	26
Figura 16	– Estágios da inversão de frequência na alimentação de um motor de indução (WEG, Motores de indução alimentados por inversor de frequência, p7).....	27
Figura 17	– Curva V/f de um inversor de frequência.....	29
Figura 18	– Família de curvas de torque produzido a partir da variação de V/f	29
Figura 19	– Curva da potência útil produzida a partir da variação de V/f.....	30
Figura 20	– Circuito equivalente do motor síncrono por fase.....	33

Figura 21	– Diagrama fasorial convencional da máquina síncrona de polos lisos funcionando como motor.....	33
Figura 22	– Característica de potência e torque para geradores e motores síncronos.....	35
Figura 23	– Diagrama fasorial do motor operando sem carga sobre-excitado $E_c > v_t$	36
Figura 24	– Curvas V de potência constante de um motor síncrono.....	37
Figura 25	– Representação de uma fonte não ideal.....	39
Figura 26	– Circuito equivalente do transformador trifásico (apenas uma fase).....	40
Figura 27	– Esquemático de ligação do motor de indução partindo diretamente na rede.....	41
Figura 28	– Curva de aceleração do motor de indução trifásico.....	42
Figura 29	– Corrente e ângulo de fator de potência durante a aceleração.....	43
Figura 30	– Envoltória da tensão da fase A durante o processo de aceleração	44
Figura 31	– Potência ativa (Em azul) e potência reativa (Em rosa) durante o processo de aceleração.....	45
Figura 32	– Torque desenvolvido pela máquina durante a aceleração.....	46
Figura 33	– Esquemático de ligação do compensador síncrono conectado diretamente na rede.....	48
Figura 34	– Curva de potência ativa (Azul) e reativa (Rosa) do compensador síncrono quando o enrolamento de campo é alimentado.....	49
Figura 35	– Características do compensador síncrono quando o enrolamento de campo é alimentado.....	50
Figura 36	– Características de velocidade e corrente de campo do compensador síncrono funcionando com corrente de campo variável através das equações 38.....	52
Figura 37	– Curva de potência ativa (Azul) e reativa (Rosa) do compensador síncrono com corrente de campo variável através da Equação 38.....	53
Figura 38	– Máquina de indução e compensador síncrono ligados a rede....	54
Figura 39	– Curva de potência ativa (Azul) e reativa (Rosa) do sistema motor de indução e compensador síncrono.....	55

Figura 40	–	Envoltória da tensão da fase A durante o processo de aceleração do sistema.....	56
Figura 41	–	Característica de aceleração do motor de indução.....	57
Figura 42	–	Resposta final da Curva de potência ativa (Azul) e reativa (Rosa) de todo o sistema.....	59
Figura 43	–	Resposta final da envoltória da tensão da fase A durante o processo de aceleração do sistema.....	60
Figura 44	–	Resposta final da aceleração do motor de indução.....	61
Figura 45	–	Resposta final do torque do motor de indução.....	62
Figura 46	–	Resposta final da corrente e ângulo de fator de potência durante a aceleração do motor.....	63
Figura 47	–	Comparação das curvas de aceleração.....	64
Figura 48	–	Comparação das curvas de torque.....	65
Figura 49	–	Comparação das curvas de corrente.....	66
Figura 50	–	Comparação das curvas de potência.....	67
Figura 51	–	Comparação entre as envoltórias de tensão.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Dados do motor de indução trifásico.....	38
Tabela 2	–	Parâmetros do compensador síncrono.....	47
Tabela 3	–	Comparação dos dados obtidos através das simulações.....	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	CARACTERIZAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	3
2.1	PARAMETRIZAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	3
2.2	TÉCNICA PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	9
2.2.1	Medição das resistências CC	9
2.2.2	Ensaio em vazio	10
2.2.3	Ensaio a rotor bloqueado	12
3	A IMPORTÂNCIA DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA	14
4	SOLUÇÕES DISPONÍVEIS NO MERCADO	15
4.1	PARTIDA DIRETA DA REDE.....	15
4.2	PARTIDA COM CHAVE ESTRELA-TRIÂNGULO.....	18
4.3	PARTIDA COM CHAVE COMPENSADORA.....	21
4.4	SOFT-STARTER.....	23
4.5	INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	27
4.6	BANCO DE CAPACITORES.....	31
5	COMPENSADOR SÍNCRONO	32
6	OBTENÇÃO DOS RESULTADOS ATRAVÉS DO MATLAB SIMULINK	38
6.1	SIMULAÇÃO DO MOTOR PARTINDO DIRETAMENTE DA REDE.....	40
6.2	SELEÇÃO E ANÁLISE DO COMPENSADOR SÍNCRONO.....	47
6.3	SIMULAÇÃO DO CONJUNTO MOTOR DE INDUÇÃO E COMPENSADOR SÍNCRONO CONTROLADO ATRAVÉS DE UM CONTROLE LINEAR DE TENSÃO..	51
6.4	SIMULAÇÃO DO CONJUNTO MOTOR DE INDUÇÃO E COMPENSADOR SÍNCRONO CONTROLADO ATRAVÉS DE UM CONTROLE DE TENSÃO CONTÍNUA E VARIÁVEL.....	58
6.5	COMPARAÇÕES ENTRE O MÉTODO DO COMPENSADOR SÍNCRONO E O MÉTODO DA PARTIDA DIRETA.....	64
7	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1. INTRODUÇÃO

Motores de indução comportam-se, no exato momento da partida, como transformadores com o secundário em curto, partindo com altíssimas correntes, podendo chegar a 8 vezes a sua corrente nominal, e baixíssimo fator de potência. Sendo assim pode-se dizer que na partida o motor consome muita potência, porém não desenvolve quase nenhum trabalho uma vez que a maior parte dessa corrente está alimentando o campo de magnetização do motor de indução.

O objetivo desse trabalho é apresentar um estudo sobre o uso de um compensador dinâmico de reativos para a partida dos motores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo, através de comparação com métodos atuais disponíveis no mercado e softwares de simulação, além disso, evidenciar as vantagens e desvantagens desse tipo de tecnologia.

Os compensadores síncronos são motores síncronos usados para disponibilizar potência reativa, eles podem atuar junto com os motores de indução trifásicos fornecendo a potência necessária para contrabalancear com o baixo fator de potência indutivo na partida dessas máquinas, fazendo com isso que a energia elétrica seja gasta de maneira mais inteligente.

Para atingir a meta final, objetivos específicos foram definidos, são eles: caracterizar as máquinas de indução, levantar as principais características dos métodos tradicionais para a resolução dos problemas abordados nesse trabalho, evidenciar as principais características do motor síncrono funcionando como compensador de reativos, simular e analisar os resultados da simulação.

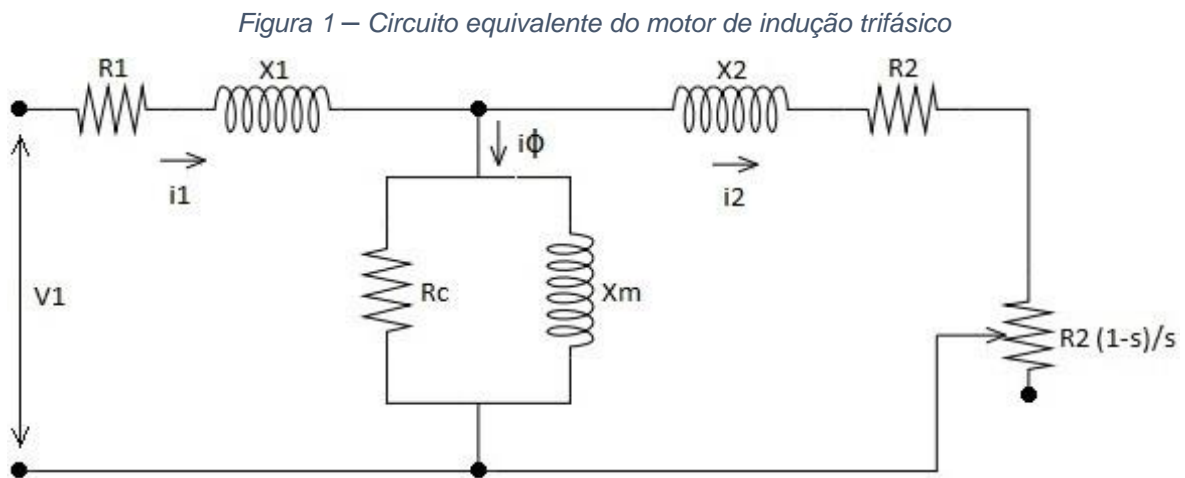
Grande parte da fundamentação teórica desse trabalho pode ser facilmente encontrada nas obras dos seguintes autores: Fitzgerald (2006), Irving (1982) e P. C. Sen (1996) como indicado nas referências bibliográficas desse trabalho científico. O trabalho está dividido da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta uma revisão concisa sobre motores de indução; o Capítulo 3 diz respeito à importância da correção do fator de potência em uma instalação elétrica; o Capítulo 4 descreve os métodos convencionais de acionamento de motores de indução trifásicos; o Capítulo 5

apresenta as principais características do compensador síncrono no que diz respeito a esse trabalho; o Capítulo 6 mostra os dados obtidos através das simulações; e por fim, o Capítulo 7 apresenta a conclusão do trabalho.

2. CARACTERIZAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

2.1. PARAMETRIZAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O comportamento elétrico do motor de indução trifásico em regime permanente e por fase, as considerações sobre os motores de indução trifásicos através de um circuito equivalente, como mostrado a seguir.



Fonte: o autor

onde:

V_1 → Tensão nos terminais do motor

i_1 → Corrente no estator

R_1 → Resistência efetiva do estator

X_1 → Reatância de dispersão do estator

i_ϕ → Corrente de excitação no estator

R_c → Resistência de perdas do núcleo

X_m → Reatância de magnetização

I_2 → Corrente no rotor referida no estator

R_2 → Resistência do rotor referida no estator

X_2 → Reatância de dispersão do rotor referida no estator

s → Escorregamento

Na maioria das literaturas a respeito do assunto foi observado que a IEEE recomenda omitir a resistência de perdas no núcleo e concentrá-las com as perdas

por atrito e ventilação, logo, para esse trabalho de graduação, em todas as considerações realizadas esse dado foi omitido de forma adequada.

A diferença entre a velocidade síncrona do fluxo girante e a velocidade mecânica do rotor é o escorregamento, porém, é mais usual representá-lo como uma fração da velocidade síncrona. Então se escreve o escorregamento da seguinte maneira.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1)$$

onde:

n_s → Velocidade síncrona

n → Velocidade do rotor

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (2)$$

onde:

f → Frequência da tensão senoidal inserida no estator

P → Número de polos do motor

A relação entre a frequência de escorregamento no rotor e a frequência síncrona, sendo a frequência de escorregamento a diferença entre a frequência síncrona do fluxo girante e a frequência mecânica do próprio rotor, vale:

$$f_r = sf_e \quad (3)$$

onde:

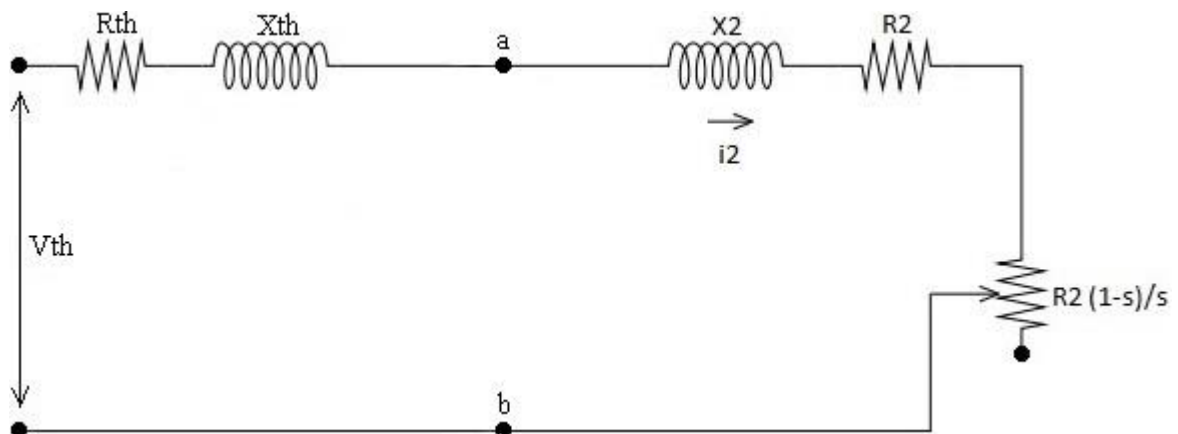
f_r → É a frequência da tensão senoidal e das correntes induzidas no circuito do rotor a um dado escorregamento

f_e → Frequência do campo magnético girante inserido nos terminais do estator

O circuito equivalente da Figura 1 é muito útil para determinar uma variedade de características de desempenho nas máquinas de indução trifásicas, entre elas o valor da corrente, velocidade, potência, conjugado e perdas.

Para obter características de grandezas do rotor é usual utilizar o equivalente de thevenin visto pelo rotor, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Circuito equivalente de Thevenin do motor de indução trifásico



Fonte: o autor

onde,

V_{th} → Tensão equivalente de thevenin

R_{th} → Resistência equivalente de thevenin do estator

X_{th} → Reatância equivalente de thevenin do estator

ω_s → Velocidade mecânica angular síncrona

n_{fases} → Todas as análises desse trabalho foram feitas pensando nos motores

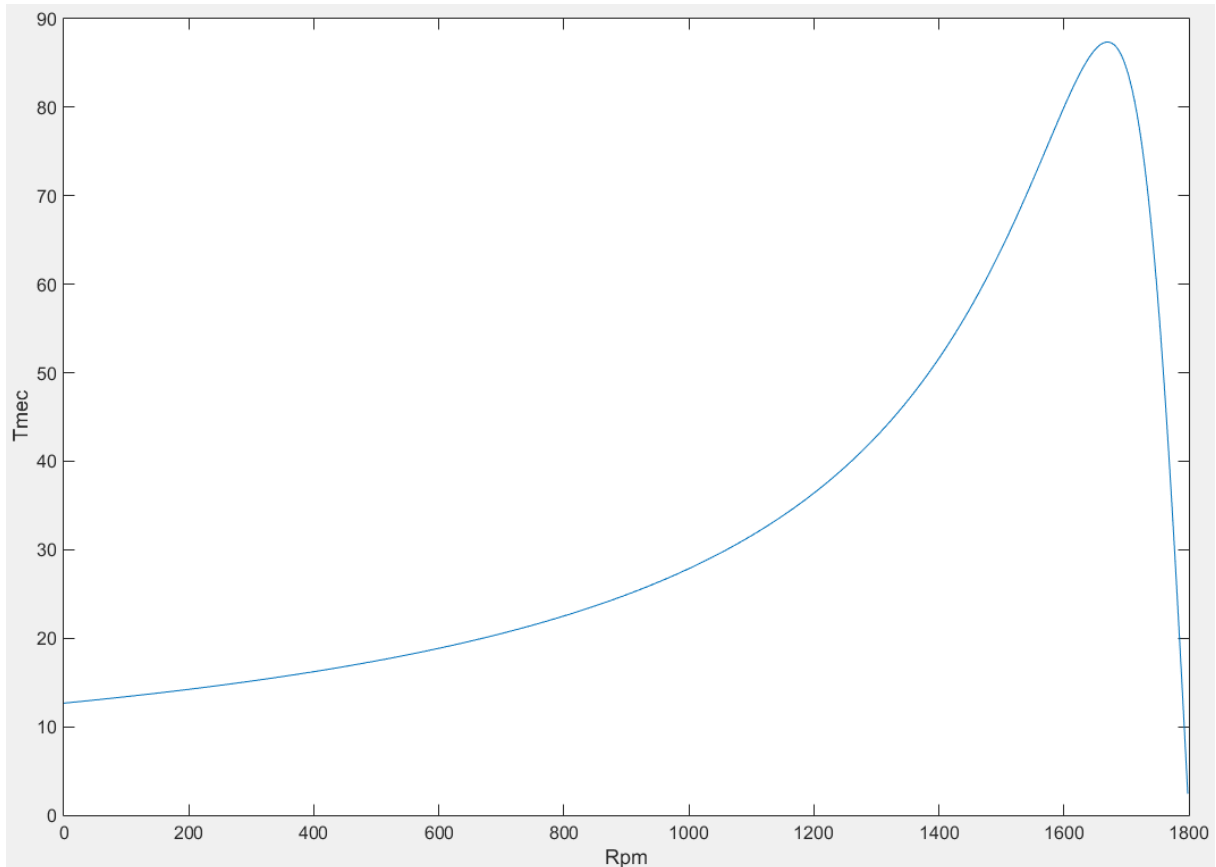
trifásicos, logo essa variável é automaticamente 3 para todos os casos

O torque mecânico no eixo é então dado pela Equação (4):

$$T_{mec} = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{fases} V_{th}^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \right] \quad (4)$$

Através da Equação (4) pode-se obter uma importante curva acerca dos motores de indução trifásicos. A Figura 3 mostra um exemplo de comportamento de uma típica curva de conjugado x escorregamento para motores de 4 polos.

Figura 3 – Exemplo de curva de conjugado x escorregamento de um motor de indução



Fonte: o autor

Pela Equação (4) conclui-se que o controle da característica do torque pode ser obtido apenas pela variação da tensão, escorregamento e do valor absoluto da velocidade através da frequência, uma vez que os outros parâmetros são fixos e característicos da construção da própria máquina.

Através do circuito equivalente do motor, como visto na Figura 1, pode-se obter a corrente do motor em função do escorregamento e, além disso, obter também seu fator de potência.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{eq}} \quad (5)$$

Onde:

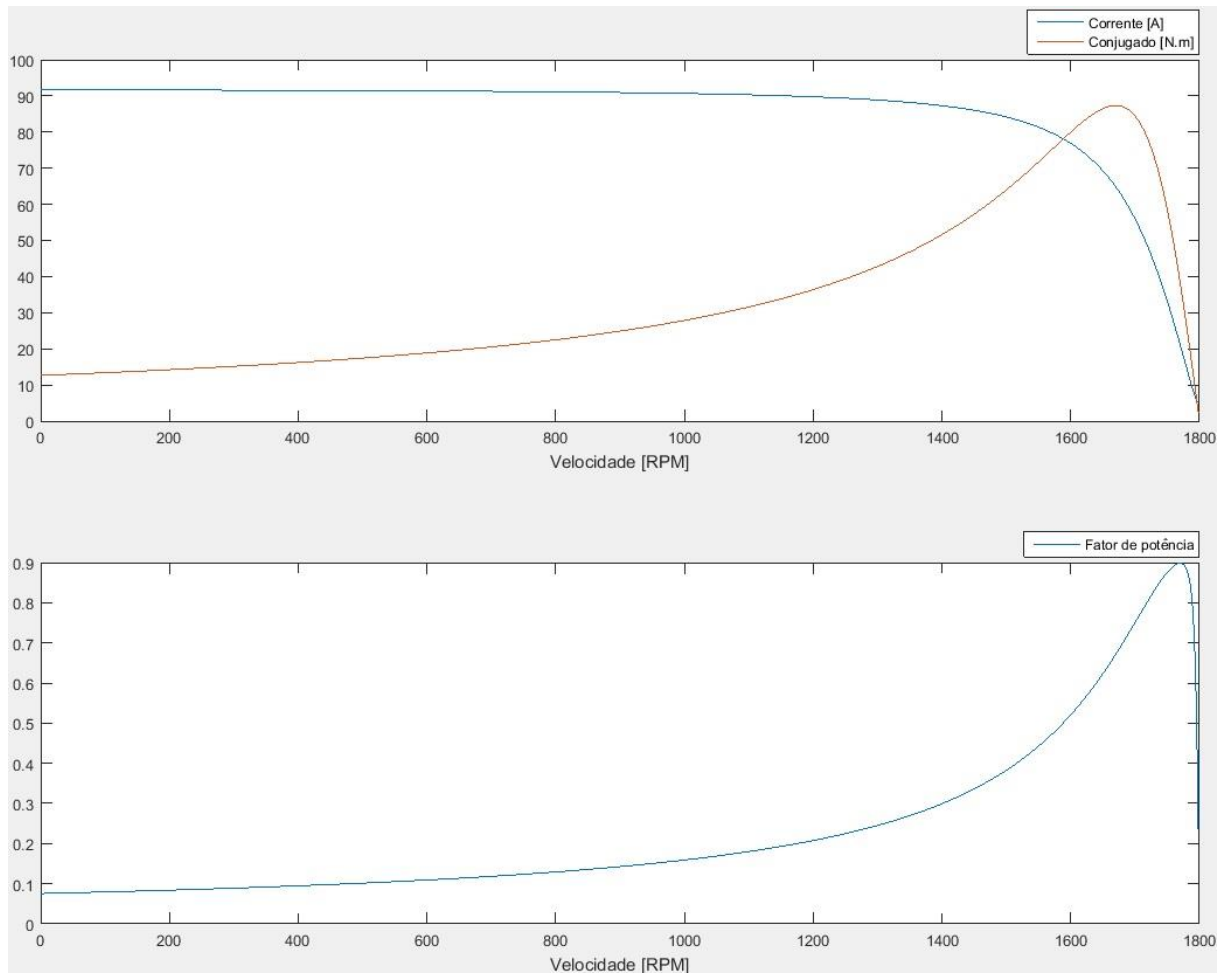
Z_{eq} → Impedância equivalente do circuito do motor

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{(jX_m)\left(\frac{R_2 + jsX_2}{s}\right)}{\frac{R_2 + jsX_2}{s} + jX_m} \quad (6)$$

Apesar de não parecer uma solução muito elegante, as equações (5) e (6), desde que sejam desprezados os transitórios, fornecem uma visão clara do comportamento da corrente e o fator de potência em um motor de indução em qualquer instante do seu funcionamento. Com o uso da Equação (5) é possível, finalmente, confrontá-la com a curva de torque x escorregamento vista na Equação (4) e tirar algumas importantes conclusões acerca do funcionamento dos motores de indução trifásicos.

A Figura 4 mostra na parte superior a corrente e o torque típico de um motor de indução desde zero até a velocidade síncrona. Na parte inferior tem-se o fator de potência da máquina.

Figura 4 – Exemplo de curva de conjugado e corrente em cima e abaixo o fator de potência, todos em função da velocidade em Rpm



Fonte: o autor

Pode-se tirar várias conclusões acerca do funcionamento dos motores de indução trifásicos através da Figura 4. Observa-se que no momento da partida, ou seja, quando o escorregamento é unitário, é o momento em que o motor absorve a maior quantidade de corrente, em torno de 6 a 8 vezes a corrente nominal, porém seu fator de potência é baixo. Isso pode ser um problema caso as condições de partida sejam muito severas, pois o consumo excessivo de corrente elétrica por um longo período de tempo pode causar diversos problemas, tais como: danificar o isolamento dos enrolamentos do motor, prejudicar o funcionamento de outros equipamentos ligados à rede ou até mesmo danificar a própria instalação elétrica.

Também é possível observar que os motores realizam a partida com um fator de potência muito baixo. Sendo assim, no momento da partida o motor está

absorvendo muita potência reativa e pouca potência ativa. A medida que o motor vai ganhando velocidade seu fator de potência vai aumentando até que a velocidade nominal seja atingida.

Outra característica importante das máquinas de indução é que a velocidade de operação onde o motor atinge o conjugado máximo é diferente do ponto onde atinge o conjugado nominal, caso o conjugado máximo fosse o mesmo que o conjugado nominal se observa através das curvas da Figura 4 que a exigência de corrente seria enorme e o fator de potência ainda seria baixo, por isso o escorregamento em que o motor desenvolve sua velocidade nominal é de aproximadamente 2%.

2.2. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Os parâmetros do motor de indução trifásico podem ser facilmente encontrados realizando-se basicamente três procedimentos, são eles: medidas das resistências CC nos enrolamentos, ensaio em vazio e ensaio a rotor bloqueado. No caso do Brasil, para ensaios dos motores de indução deve ser usada a norma ABNT NBR 5383-1 2002 – Norma brasileira para ensaios de motores de indução trifásicos, que mostra como proceder para a obtenção dos parâmetros pertinentes a cada ensaio. Vale a pena ressaltar que os métodos de ensaio não são o tema desse trabalho, portanto as técnicas descritas aqui são apenas formas bem diretas e sem muita explicação de como obter os parâmetros do motor, caso haja necessidade real de executar esses procedimentos o autor desse trabalho recomenda fortemente consultar as normas pertinentes.

2.2.1. Medição das resistências CC

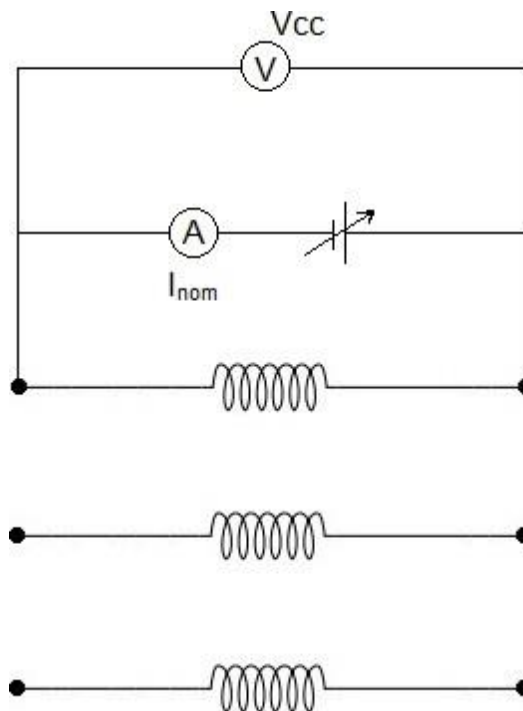
Considerando o circuito equivalente da Figura 1 como referência, pode-se facilmente obter a resistência R_1 do estator para cada fase através do seguinte procedimento.

Em uma fase qualquer, ligar uma fonte de corrente contínua variável até que circule a corrente nominal por esta fase, logo a expressão que fornecerá o valor de R_1 é:

$$R_1 = \frac{V_{cc}}{I_{nom}} \quad (7)$$

A Figura 5 mostra o esquemático dos três enrolamentos do estator da máquina de indução trifásica e como realizar as medidas.

Figura 5 – Ilustração de como obter R_1 através dos enrolamentos do estator



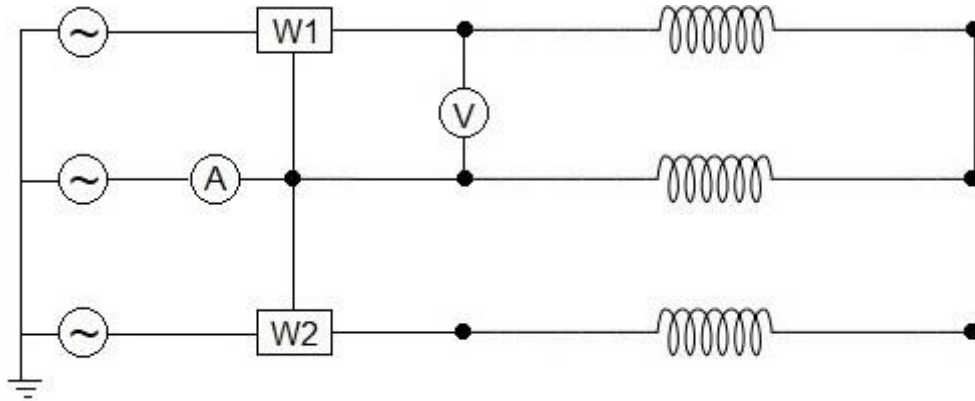
Fonte: o autor

2.2.2. Ensaio em vazio

Normalmente realiza-se esse ensaio ajustando frequência e tensão nominal em seu terminal e aguardando tempo suficiente para que o atrito nos mancais não cause erros significativos nas medições. Nesse ensaio estamos interessados em obter os seguintes dados: Corrente de excitação através do amperímetro e as perdas no

núcleo, que pode ser obtido através do método dos dois wattímetros. Segue abaixo um esquema de ligação para os aparelhos de medição.

Figura 6 – Esquema de montagem dos medidores para o ensaio a vazio



Fonte: o autor

Como aproximação será considerada nula a perda de potência sobre a resistência do estator, pelo motivo de que a corrente à vazio é muito baixa, sendo assim:

$$R_c = \frac{3 \frac{V^2}{\sqrt{3}}}{P_{n\u00facleo}} \quad (8)$$

Como para a condição a vazio o escorregamento é muito baixo, o ramo do rotor pode ser subtraído do circuito equivalente fazendo com que a impedância de dispersão equivalente para condição a vazio seja:

$$X_{vazio} = X_1 + X_m \quad (9)$$

Ainda não é possível saber os valores de X_1 e X_m da Equação (9), mas pode-se descobrir o valor de X_{vazio} .

$$Z_{vazio} = \frac{V_L}{I_L \sqrt{3}} \quad (10)$$

A impedância do novo circuito equivalente desconsiderando o rotor fica sendo a tensão de fase dividida pela corrente de linha medida através dos aparelhos de medição, mas sabe-se também que pode-se decompor uma impedância em suas partes real e imaginária, então a expressão para que X_{vazio} seja encontrado é:

$$X_{vazio} = \sqrt{Z_{vazio}^2 - R_c^2} \quad (11)$$

2.2.3. Ensaio a rotor bloqueado

O esquema para a montagem dos aparelhos de medição do ensaio de rotor bloqueado é o mesmo do ensaio a vazio, para efeito de visualização basta conferir a Figura 6.

O ensaio de rotor bloqueado fornece informações suficientes para que possam ser descobertos os valores dos parâmetros das reatâncias de dispersão e da resistência do rotor.

Com o rotor bloqueado, ou seja, forçando com que o seu escorregamento seja unitário, varia-se gradativamente o valor da tensão até que o amperímetro acuse corrente nominal em sua leitura. Com o valor de tensão obtido no voltímetro e com a potência obtida através do método dos dois wattímetros tem-se que:

$$P_{RB} = 3I_{RB}^2(R_1 + R_2) \quad (12)$$

Através da Equação (12), pode-se facilmente encontrar o valor de R_2 , já que o mesmo é a única incógnita da Equação, pois através do método dos dois wattímetros a potência de rotor bloqueado já foi encontrada, assim como a corrente de rotor bloqueado.

$$Z_{RB} = \frac{V_{RB}}{\sqrt{3}I_{RB}} \quad (13)$$

Onde:

$$X_{RB} = \sqrt{Z_{RB}^2 - (R_1 + R_2)^2} \quad (14)$$

Como:

$$X_{RB} = X_1 + X_2 \quad (15)$$

E sabendo também que para os motores classe A a reatância referida ao estator de dispersão é igual à reatância de dispersão do rotor, então:

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{RB}}{2} \quad (16)$$

E para finalizar basta aplicar o valor de X_1 na Equação (9) e encontrar o valor de X_m .

3. A IMPORTÂNCIA DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Corrigir o baixo fator de potência na partida dos motores de indução é importante, pois apesar da potência reativa não realizar trabalho, ela ocupa o mesmo espaço que a potência ativa em uma rede. Pode-se dizer que quanto maior a quantidade de potência reativa em uma determinada rede, menor será a capacidade da mesma em distribuir potência ativa.

Apesar de necessária para a produção de fluxo magnético, a potência reativa circulante deve ser a mínima possível, pois o excesso dela cria a necessidade de condutores com maior seção, gera perdas por aquecimento e necessidade de superdimensionamento dos transformadores. Quando um equipamento absorve muita energia reativa torna-se necessário compensar essa energia, pois além dos motivos citados anteriormente a distribuidora de energia pode cobrar multa pelo baixo fator de potência de uma instalação. Como boa prática é sempre bom compensar a energia reativa o mais próximo possível da carga para que haja o mínimo possível de transporte de energia reativa sendo feita pelos condutores.

No Brasil há exigências de que o nível de fator de potência de uma instalação seja maior do que 0,92 (indutivo ou capacitivo). Caso seja menor que 0,92 indutivo em um intervalo consecutivo de 18h entre 6:00h e 00:00h, ou capacitivo em um intervalo de 6h entre 00:00h e 6:00h, são previstas multas de acordo com EDP (2017). As multas para os infratores são baseadas na quantidade de energia reativa excessiva consumida durante o mês e no tipo de contrato do cliente.

4. SOLUÇÕES DISPONÍVEIS NO MERCADO

Como visto na sessão 2 o fator de potência está diretamente ligado à corrente do motor de indução trifásico, sendo assim nessa sessão serão apresentados os principais métodos de partida para os motores de indução trifásicos.

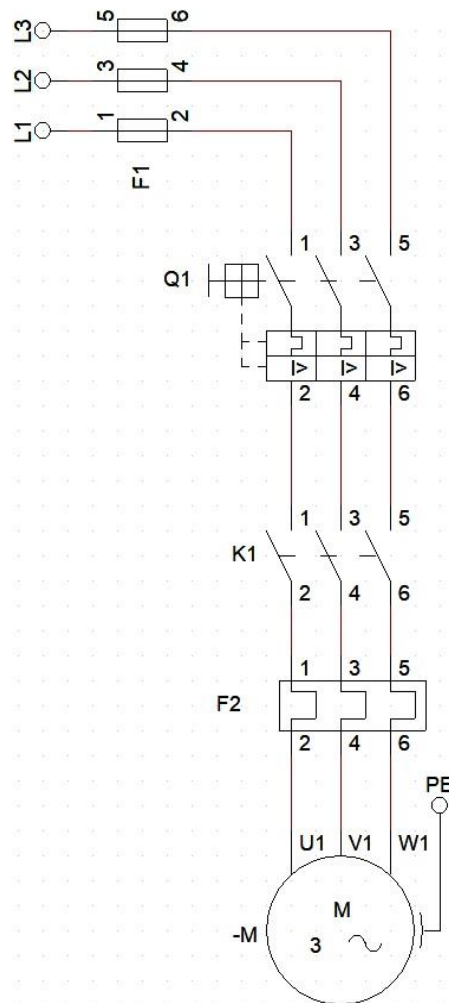
4.1. PARTIDA DIRETA DA REDE

Apesar de ser frequentemente utilizado tanto para pequenas aplicações residenciais quanto industriais, nesse método de partida não há nenhuma preocupação com a corrente e fator de potência e é recomendado apenas para motores de no máximo 7,5 cv de potência. É importante que a capacidade nominal da rede seja suficientemente elevada para aguentar a elevada corrente de partida do motor.

A partida direta é considerada como o método mais simples possível, não sendo necessários dispositivos especiais. Nesse método o motor é conectado diretamente à rede e recebe plena tensão.

A Figura 7 mostra os diagramas de ligação do circuito de potência e comando para a partida de um motor de indução conectado diretamente na rede.

Figura 7 – Esquema de ligação para partida direta



Fonte: Souza (2009, página 25)

Como já observado na sessão 2 desse trabalho é possível descobrir de forma analítica o valor do conjugado, corrente e fator de potência na partida dos motores de indução, bastando apenas realizar adequadamente a substituição do escorregamento pelo valor unitário nas equações de torque e corrente.

Através das equações 4, 5 e 6 e realizando a substituição do escorregamento pelo valor unitário obtém-se a Equação (17):

$$T_p = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{fases} V_1^2 R_2}{(R_{th} + R_2)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \right] \quad (17)$$

Como a única variável da Equação (17) é a tensão de terminal, para efeitos de simplificação, pode-se reescrever toda a parte constante da Equação do torque de partida por:

$$k' = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{fases} R_2}{(R_{th} + R_2)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \right] \quad (18)$$

Adotando o mesmo procedimento para encontrar o valor da impedância equivalente na partida do motor, chega-se a:

$$Z_{eqP} = R_1 + jX_1 + \frac{(jX_m)(R_2 + jX_2)}{(R_2 + jX_2) + jX_m} \quad (19)$$

Como a impedância na partida do motor também é um valor constante, se pode realizar a mesma simplificação feita na Equação (18). Sendo assim:

$$k = \frac{1}{Z_{eqP}} \quad (20)$$

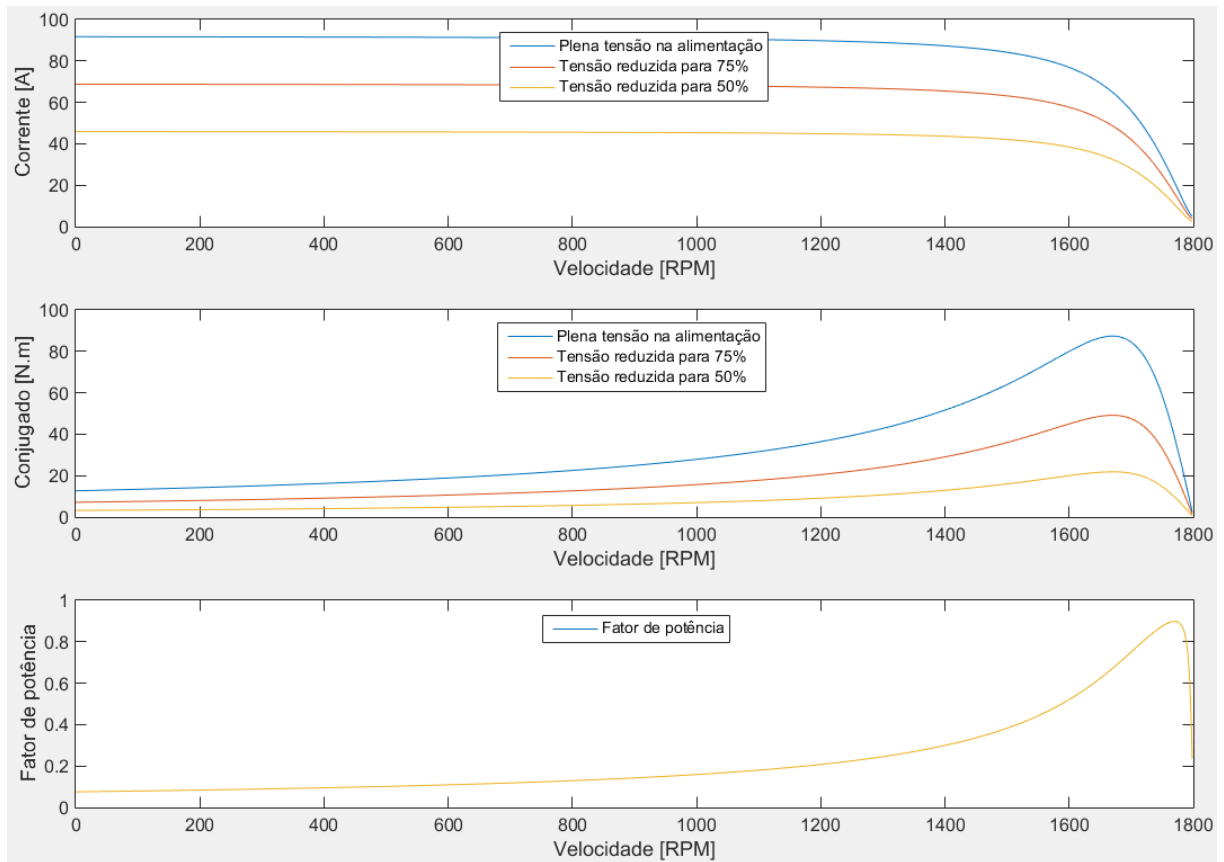
Reescreve-se as equações do conjugado e corrente da seguinte maneira:

$$I_p = kV_1 \quad (21)$$

$$T_p = k'V_1^2 \quad (22)$$

O comportamento da corrente absorvida da rede, do torque produzido pelo motor e do fator de potência com a variação da tensão de alimentação pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Demonstração dos efeitos provados pela mudança de tensão usando o método de partida direta



Fonte: o autor

Observa-se através da Figura 8 que variando a tensão de alimentação tem-se uma mudança proporcional da corrente e uma mudança quadrática no torque. Além disso, observou-se que independente da tensão da alimentação o fator de potência permanece inalterado, já que é função apenas da impedância do motor e não da tensão de alimentação.

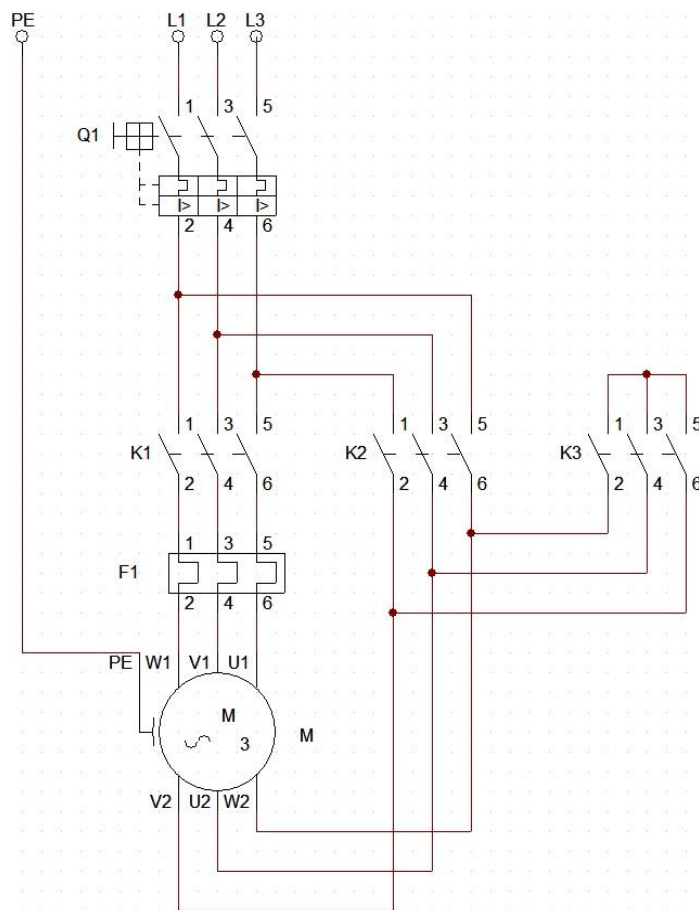
4.2. PARTIDA COM CHAVE ESTRELA-TRIÂNGULO

A partida com chave estrela-triângulo é um tipo de partida com tensão reduzida e tem como objetivo partir o motor com seus enrolamentos ligados em estrela. A tensão de alimentação em cada fase dos enrolamentos do motor é uma fração da tensão de linha da rede como mostrado na Equação (23).

$$V_1 = \frac{V_{linha}}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

Quando o motor atinge valores próximos à velocidade nominal a ligação em estrela é desfeita e então executada a ligação triângulo, que faz com que a tensão nos enrolamentos do motor seja igual à tensão de linha da rede. Só é possível acionar dessa maneira motores que possuem seis terminais, dupla tensão nominal de alimentação e que o torque reduzido na partida seja suficiente para movimentar a carga.

Figura 9 – Esquema de ligação para partida usando uma chave estrela-triângulo



Fonte: Souza (2009, página 31)

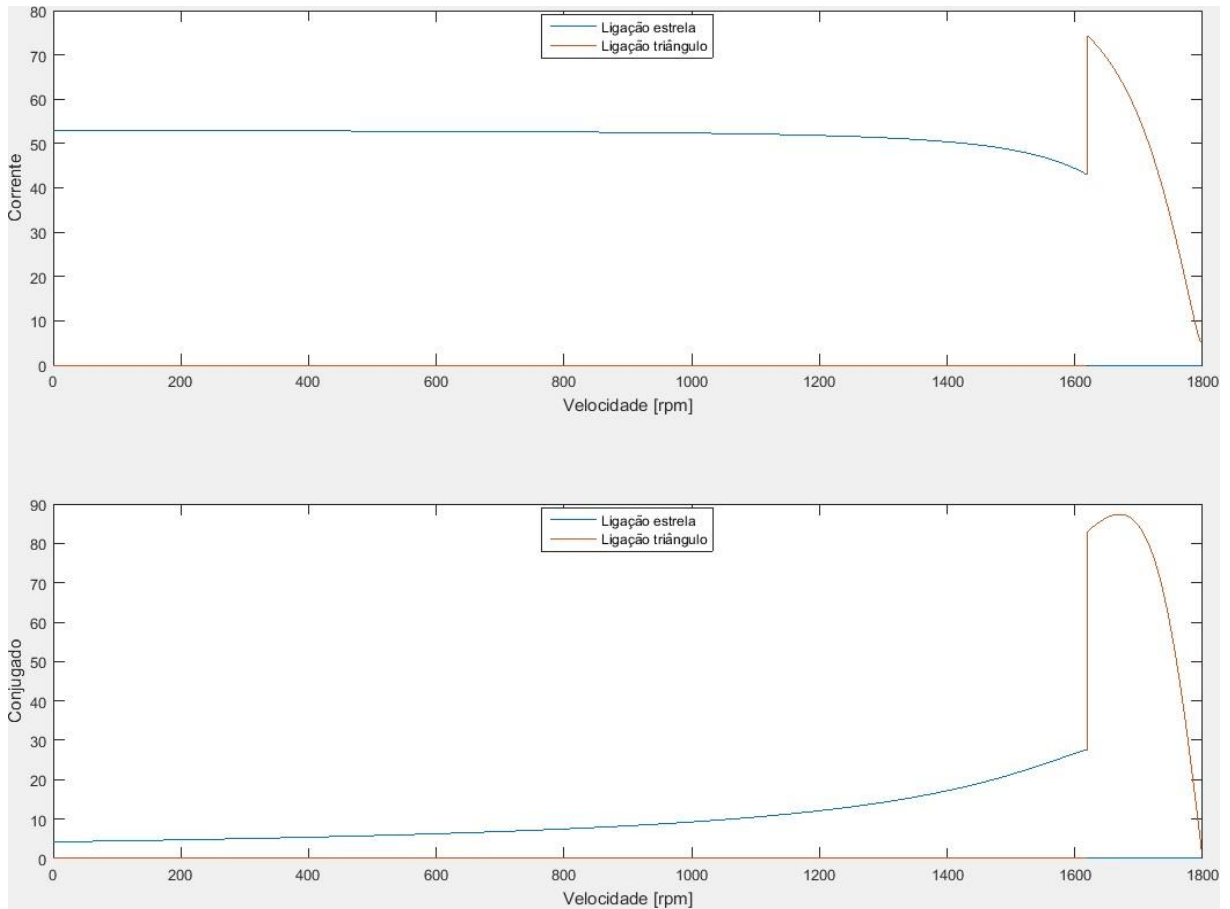
Como visto anteriormente através da explicação sobre o método de partida direta da rede, pode-se afirmar que o fator de potência não sofrerá nenhuma alteração enquanto a corrente de partida e o torque na partida sofrerão variação que dependerá da tensão da alimentação naquele instante.

$$I_P = k \frac{V_{linha}}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

$$T_P = k' \frac{V_{linha}^2}{3} \quad (25)$$

A Figura 10 demonstra as curvas de corrente e conjugado através da ligação estrela-triângulo, ignorando o pico transitório de corrente gerado pela comutação entre estrela e triângulo. Apesar de não estar ilustrado na Figura esse fato não deve ser menosprezado, pois caso não haja cuidado o pico de corrente pode acabar sendo maior do que partir o motor diretamente da rede. Outro assunto que deve ser tratado com muito cuidado é o fato de que se o novo torque reduzido na partida do motor não for suficiente para movimentar a carga o motor pode demorar muito para acelerar inviabilizando o uso da chave.

Figura 10 – Demonstração dos efeitos provados pela mudança de tensão usando o método de partida com chave estrela-triângulo



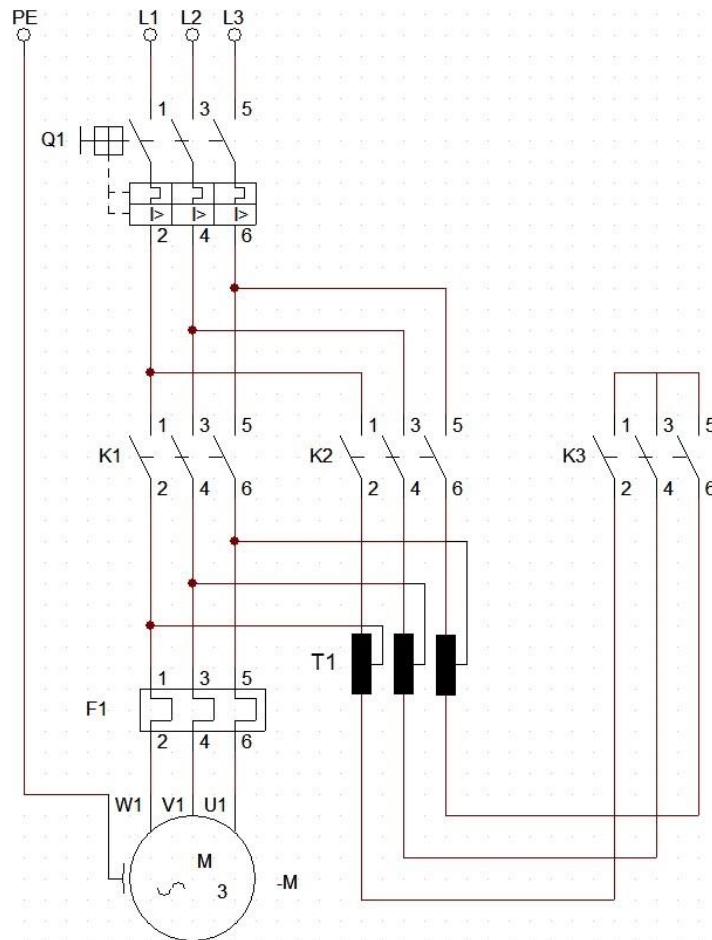
Fonte: o autor

4.3. PARTIDA COM CHAVE COMPENSADORA

A chave compensadora é basicamente composta por um autotransformador e assim como a chave estrela-triângulo, a chave compensadora é um método que visa partir o motor com uma tensão abaixo da nominal e aumentá-la progressivamente até atingir a tensão nominal. Uma das grandes vantagens da chave compensadora sobre a chave estrela-triângulo é o fato do autotransformador se comportar como uma reatância que impede o crescimento abrupto da corrente na comutação da tensão entre as derivações.

Esse tipo de chave é recomendado para acionar motores de potência elevada, com cargas com altos índices de atrito. O esquema de ligação para uma chave compensadora é mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Esquema de ligação para partida usando uma chave compensadora



Fonte: Souza (2009, página 32)

Assim como a chave estrela-triângulo, esse método reduz a corrente de partida proporcionalmente à redução da tensão de alimentação, mas também tem como desvantagem a redução do torque pelo quadrado da tensão.

$$I_P = k \frac{V_{linha}}{a_{tap}} \quad (26)$$

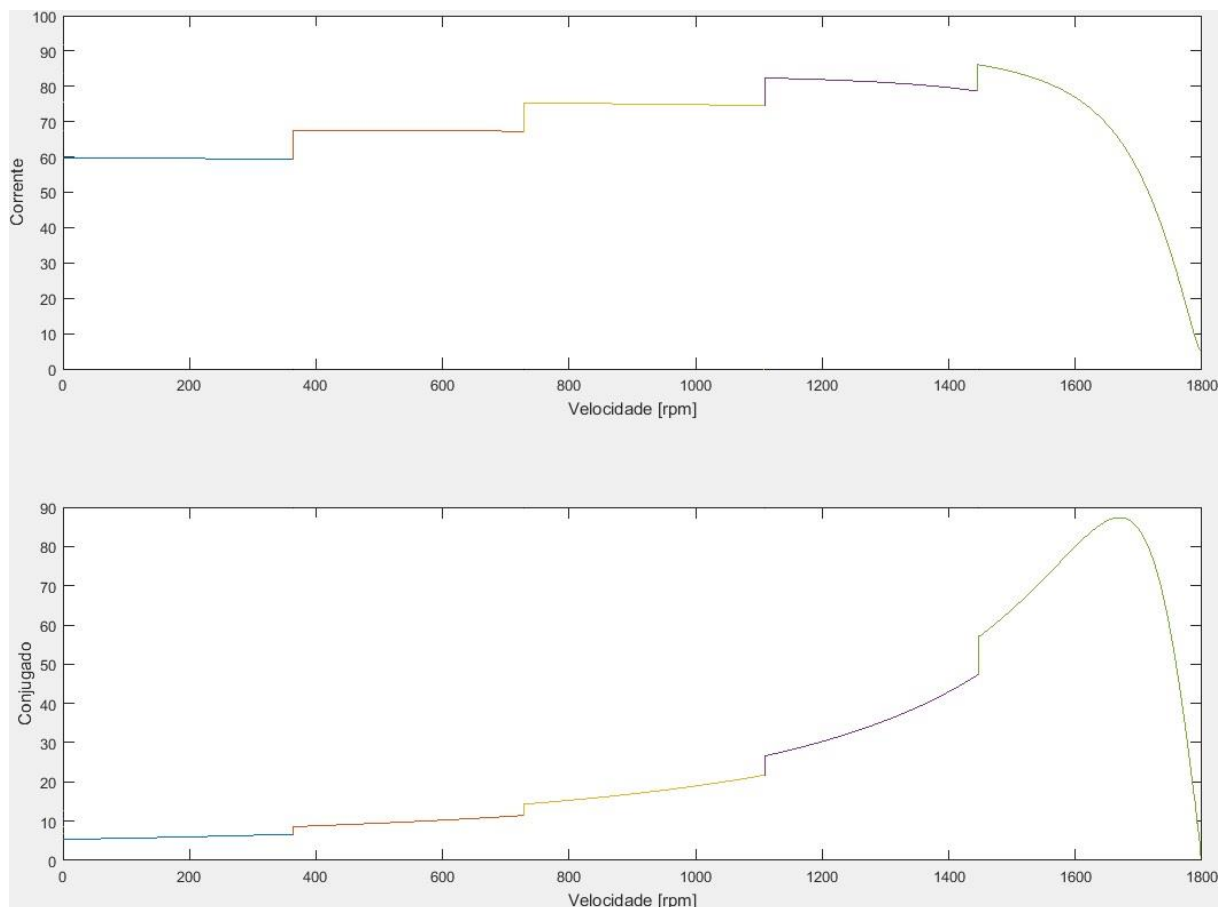
$$T_P = k' \frac{V_{linha}^2}{a_{tap}^2} \quad (27)$$

Onde:

a_{tap} → Relação de transformação do autotransformador

A Figura 12 mostra o motor realizando a partida em vários estágios. O número de estágios depende de quantas derivações possuir o autotransformador. Apesar de ser um método que possui uma resposta melhor do que usando uma chave estrela-triângulo, um autotransformador pode custar muito caro dependendo da potência do motor e, além disso, pode ocupar bastante espaço, o que pode ser um problema para determinadas situações.

Figura 12 – Demonstração dos efeitos provados pela mudança de tensão usando o método de partida com chave compensadora

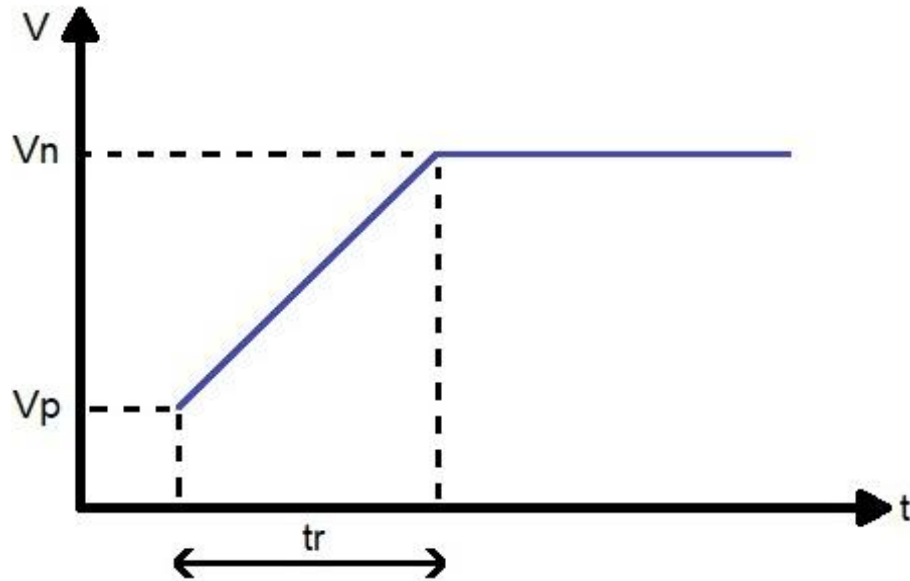


Fonte: o autor

4.4. SOFT-STARTER

O soft-starter é um método bem moderno que, através de comandos micro processados, controla o ângulo de condução de tiristores que variam a tensão enviada ao motor de indução linearmente em formato de rampa, como mostrado na Figura 13, fazendo com que a corrente não atinja picos muito elevados.

Figura 13 – Curva de tensão em rampa na saída do soft-starter



Fonte: o autor

Onde:

V_n → Tensão nominal de alimentação do motor de indução

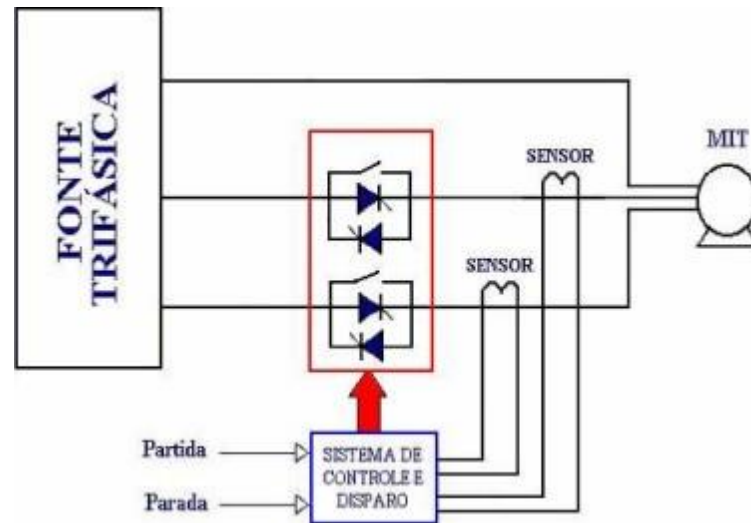
V_p → Tensão de partida previamente configurada

t_r → Tempo da rampa de aceleração

Deve-se tomar cuidado para configurar o soft-starter de modo que o motor tenha torque suficiente para iniciar movimento na carga e a partir desse ponto elevar a tensão linearmente até que o motor tenha tensão nominal em seus terminais.

O esquema a seguir é uma simplificação tanto do circuito de potência quanto do circuito de controle.

Figura 14 – Esquema genérico de um soft-starter

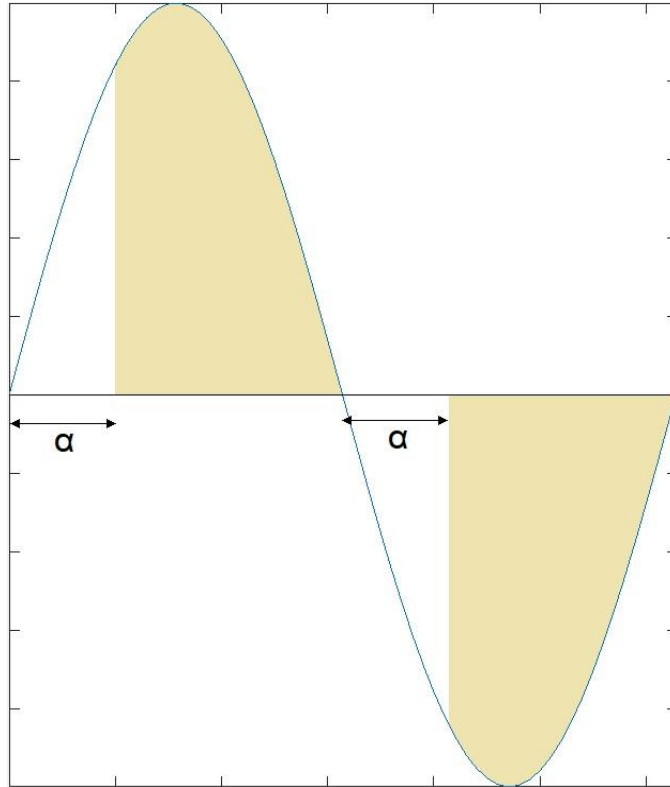


Fonte: Mundo da elétrica (2018)

Apesar de ser mais sofisticado, o soft-starter também se trata de um método que tem como objetivo reduzir a tensão eficaz nos enrolamentos do motor para diminuir sua corrente. Esse método, assim como os anteriores, não melhora o fator de potência apesar de diminuir consideravelmente a corrente necessária para partir a máquina.

A Figura 15 ilustra uma tensão senoidal qualquer sendo chaveada por tiristores. O valor de α é variável e sua faixa vai de 0 até 180°.

Figura 15 – Tensão senoidal chaveada por tiristor aplicada ao motor



Fonte: o autor

Onde:

α → ângulo de disparo dos tiristores

Quando α é zero o valor eficaz da tensão é o valor de tensão da rede, mas para qualquer outro valor de α a tensão eficaz segue a Equação:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_{pico} \text{sen}(wt))^2 d(wt)} \quad (28)$$

E da mesma maneira que foi feito para os outros métodos, pode-se encontrar a corrente na partida e o conjugado através da tensão eficaz.

$$I_P = kV_{ef} \quad (29)$$

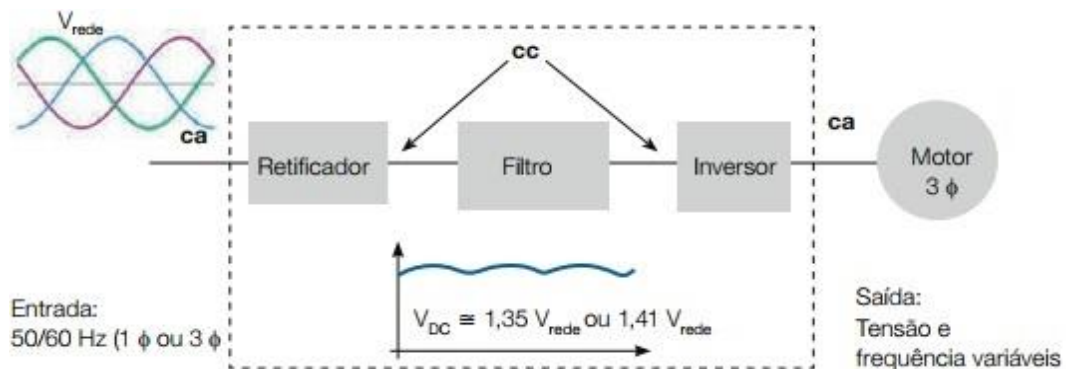
$$T_P = k'V_{ef}^2 \quad (30)$$

Esse método é recomendado para cargas que possuem várias partidas por hora e apesar de melhorar as características na partida do motor em relação às anteriores é um método que introduz harmônicos que podem distorcer a senóide em toda a rede piorando a qualidade da energia em toda a instalação.

4.5. INVERSOR DE FREQUÊNCIA

De acordo com WEG, Motores de indução alimentados por inversor de frequência (2016, p6), os inversores de frequência são dispositivos eletrônicos que transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes em uma tensão com amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e conseqüentemente a velocidade mecânica de rotação da máquina. A Figura 16 mostra o esquemático de um inversor de frequência.

Figura 16 – Estágios da inversão de frequência na alimentação de um motor de indução



Fonte: Motores de indução alimentados por inversor de frequência (2016, p7)

De acordo com WEG, Motores de indução alimentados por inversor de frequência (2016, página 4), o torque de um motor de indução também pode ser escrito como:

$$T = k_1 \phi_m I_2 \quad (31)$$

Sendo que

$$\phi_m = k_2 \frac{V_1}{f_1} \quad (32)$$

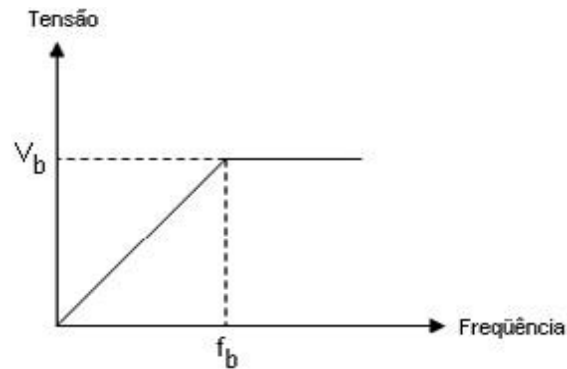
onde:

- T → Torque disponível na ponta do eixo em (N.m)
- k_1 → Constante que depende do material e do projeto da máquina
- k_2 → Constante que depende do material e do projeto da máquina
- I_2 → Corrente do rotor (A)
- V_1 → Tensão estatórica (V)
- f_1 → Frequência da tensão de alimentação (hertz)
- ϕ_m → Fluxo de magnetização (Wb)

A partir das equações (29) e (30), pode-se dizer que, desprezando-se a queda de tensão ocasionada pela resistência e pela reatância dos enrolamentos estatóricos e admitindo-se que a corrente depende da carga e que essa é constante, percebe-se que variando proporcionalmente a amplitude e frequência da tensão de alimentação o fluxo de magnetização e, conseqüentemente, o torque permanecem constantes. O motor fornece assim um ajuste contínuo de velocidade e conjugado.

Assim como mostrado na Figura 17, a variação da relação entre tensão e frequência é feita linearmente até a frequência base (nominal) do motor. Acima dessa, a tensão é máxima (nominal) e permanece constante, havendo então apenas a variação da frequência aplicada ao enrolamento estatórico do motor.

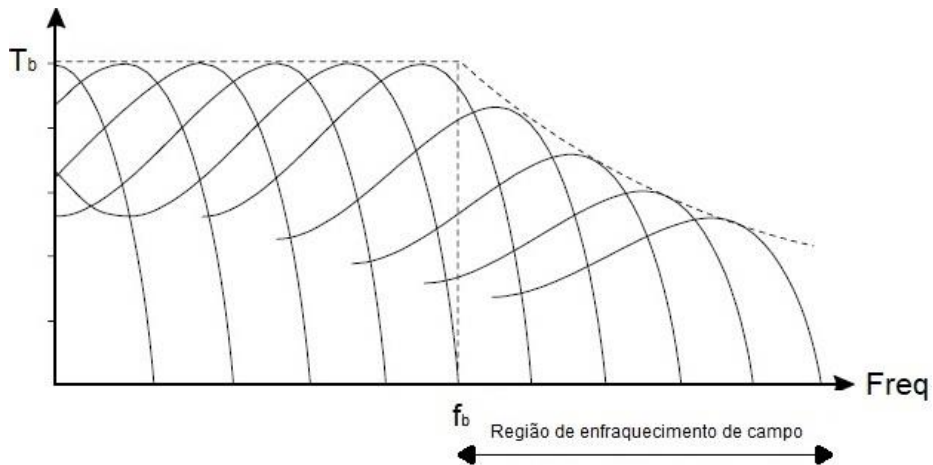
Figura 17 – Curva V/f de um inversor de frequência



Fonte: o autor

Assim, acima da frequência base caracteriza-se a chamada região de enfraquecimento de campo, pois ali o fluxo decresce com o aumento da frequência, provocando também a diminuição de torque.

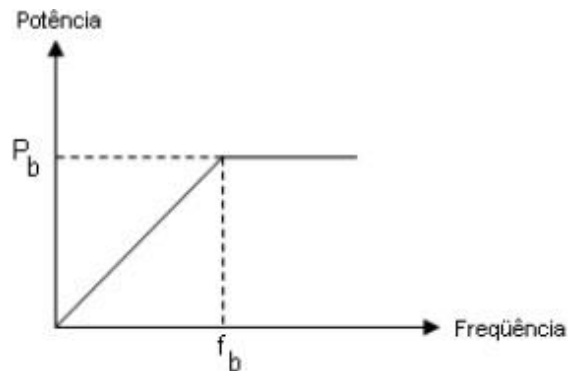
Figura 18 – Família de curvas de torque produzido a partir da variação de V/f



Fonte: o autor

Nota-se, portanto, que o torque permanece constante até a frequência base e decresce gradativamente acima desta. Como a Potência = Torque x Rotação, a potência útil do motor cresce linearmente até a frequência base e permanece constante acima desta.

Figura 19 – Curva da potência útil produzida a partir da variação de V/f



Fonte: o autor

Uma grande inconveniência desse tipo de controle é que para baixas velocidades haverá perdas na refrigeração da máquina, uma vez que o ventilador acoplado em seu rotor girará mais lentamente devido à diminuição da rotação. Para evitar problemas com sobreaquecimento, devido à perda da capacidade de refrigeração, deve-se também reduzir a potência desenvolvida pela máquina, sob o risco de danificar permanentemente o isolamento térmico em seus condutores.

Apesar de que atualmente, a utilização de inversores de frequência para partir motores de indução seja uma alternativa inviável, esse método é o que apresenta os melhores resultados considerando todos os anteriores. Na prática, os inversores de frequência são equipamentos muito úteis quando se trata do controle de velocidade dos motores de indução. Sendo assim, na posse de um desses equipamentos ele pode, eficientemente, também ser utilizado para realizar a partida dessas máquinas.

4.6. BANCO DE CAPACITORES

Os bancos de capacitores, assim como os compensadores síncronos, podem ser utilizados para reduzir os impactos da grande corrente absorvida na partida dos motores de indução, porém ao contrário dos métodos mencionados anteriormente o objetivo do banco de capacitores é compensar a energia reativa ao invés de usar o ajuste de tensão. Isso pode ser verificado através do trabalho de Salin (2011).

Os bancos de capacitores podem ser estáticos ou dinâmicos, sendo que para a partida dos motores de indução os compensadores dinâmicos são muito mais úteis

pois fornecem exatamente o que se deseja compensar levando em consideração as necessidades da rede, enquanto os compensadores estáticos fornecem uma quantidade fixa de reativos enquanto estiverem conectados à rede.

Apesar de que os bancos de capacitores e os compensadores síncronos possuem o mesmo objetivo, que é compensar a quantidade de potência reativa circulando na rede, os efeitos causados na rede pela utilização dos dois são distintos, criando a necessidade da realização de outro trabalho para compará-los de maneira adequada. Sendo assim, esse trabalho está limitado apenas a comparações superficiais entre os dois métodos.

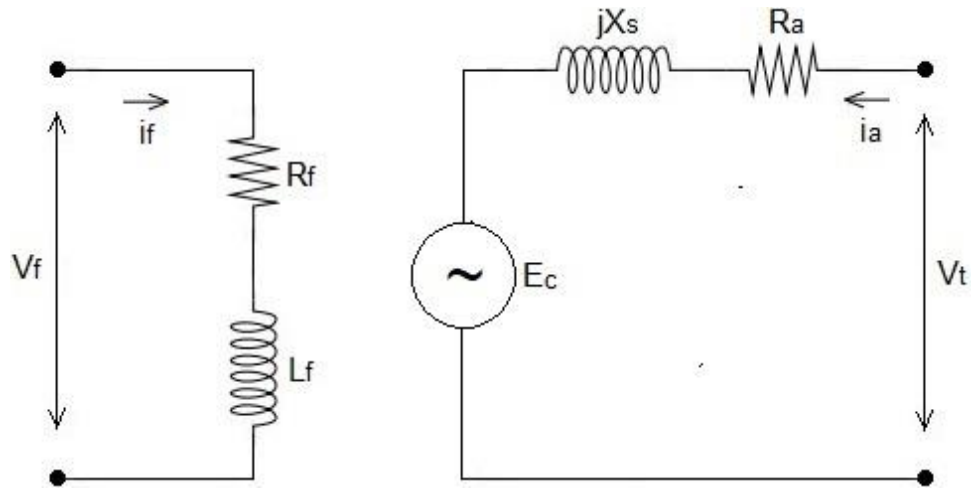
5. COMPENSADOR SÍNCRONO

As máquinas síncronas possuem esse nome por operarem em sincronismo com a rede. Essas máquinas possuem grande aplicação na indústria devido a algumas características especiais, são elas: alto rendimento, velocidade constante sobre variação de carga e possibilidade de trabalhar como compensador síncrono. Além disso, assim como as máquinas de indução, essas máquinas são muito robustas, tem baixo custo em manutenção e possuem altos torques. No caso especial desse trabalho, pode-se retirar a ponta do eixo do rotor desse motor síncrono, com o objetivo de reduzir eventuais perdas, pois a função do compensador dinâmico de reativos é fornecer reativos para a rede, e não desenvolver torque.

De acordo com WEG, Motores síncronos (2016, p5) “Nas indústrias, geralmente predominam as cargas reativas indutivas, que são os motores de indução de pequeno porte ou de rotação baixa, as quais requerem considerável quantidade de potência reativa (kVAr) consumida como corrente de magnetização. Para suprir a necessidade da rede de potência reativa, além da possibilidade de utilização de bancos de capacitores, os motores síncronos são frequentemente utilizados com essa finalidade”.

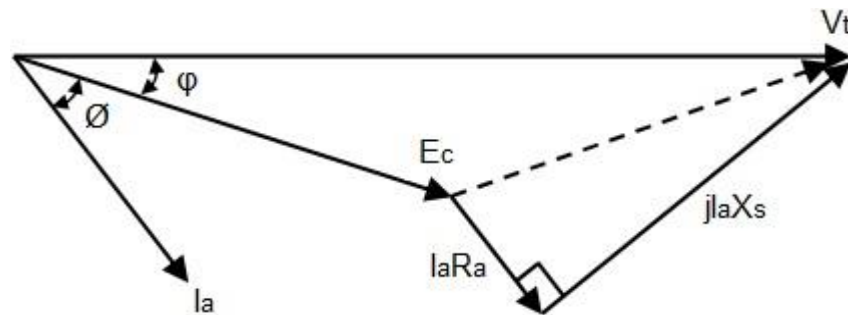
Para essa sessão foi utilizado o material complementar Curso de engenharia elétrica - UFG (2016), dele foram retirados o circuito equivalente como mostrado na Figura 20 e o equacionamento visto mais adiante.

Figura 20 – Circuito equivalente do motor síncrono por fase



Fonte: o autor

Figura 21 – Diagrama fasorial convencional da máquina síncrona de polos lisos funcionando como motor



Fonte: o autor

onde:

- V_f → Tensão CC aplicada no circuito de campo do rotor
- I_f → Corrente de campo CC
- R_f → Resistência do enrolamento de campo
- L_f → Indutância de magnetização
- E_c → Tensão interna (de excitação) da máquina síncrona
- R_a → Resistência de armadura
- X_s → Reatância síncrona
- I_a → Corrente de armadura CA
- V_t → Tensão de alimentação

Uma máquina síncrona pode funcionar como motor ou gerador. A diferença entre ambas é o sentido da corrente, porém como o maior interesse desse trabalho é usar a máquina síncrona como compensador síncrono, todas as representações serão feitas considerando a corrente entrando em seus terminais.

Tanto para a máquina síncrona operando como motor quanto gerador a expressão final da potência e torque que podem ser obtidos através do diagrama fasorial são as mesmas. A potência na máquina síncrona considerando as três fases pode ser escrita como

$$P = 3VI\cos(\emptyset) \quad (33)$$

Considerando o diagrama fasorial da Figura 21,

$$X_s I \cos\emptyset = E_c \sin\varphi \quad (34)$$

Substituindo a Equação (32) em Equação (31), tem-se a potência elétrica total nas três fases

$$P = \frac{3VE_c}{X_s} \sin\varphi \quad (35)$$

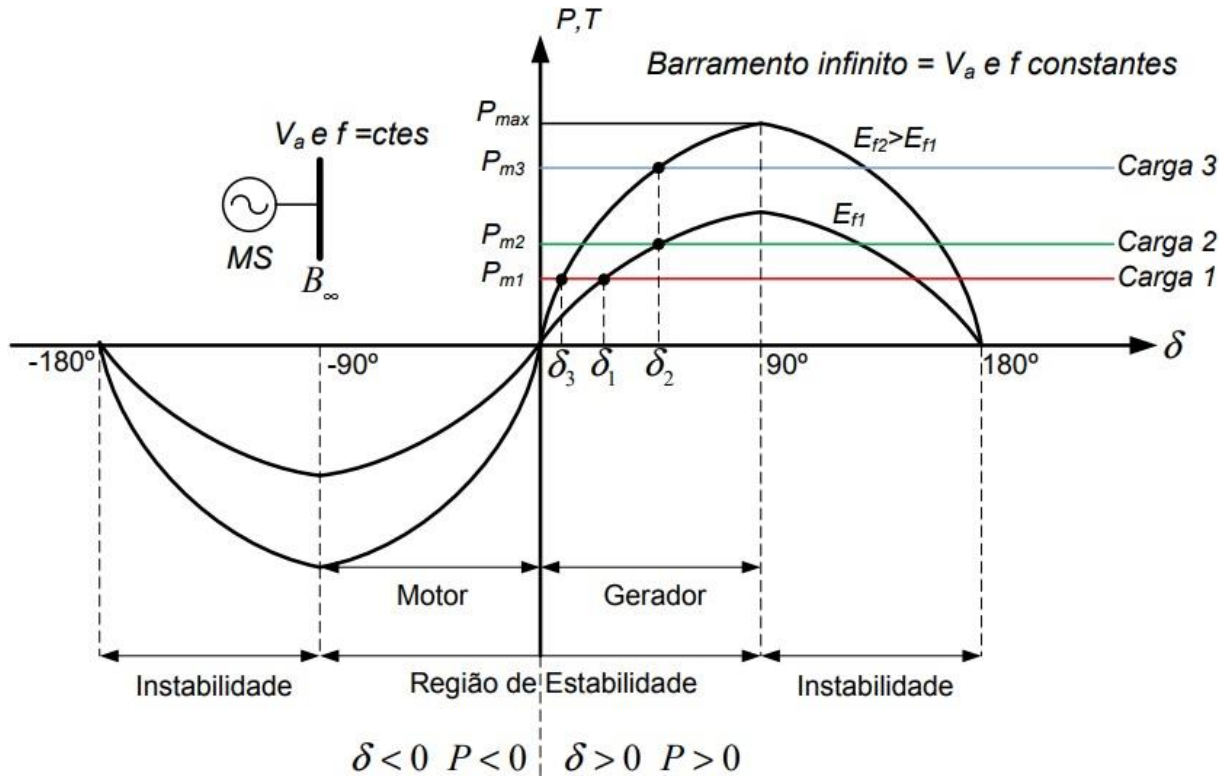
A potência mecânica desenvolvida pelo motor pode ser escrita como

$$P_{mec} = T\omega_s \quad (36)$$

Sendo assim, admitindo que $P_{mec} = P$, pode-se dizer que o torque no eixo do motor é

$$T = 3 \frac{VE_c}{\omega_s X_s} \sin\varphi \quad (37)$$

Figura 22 – Característica de potência e torque para geradores e motores síncronos



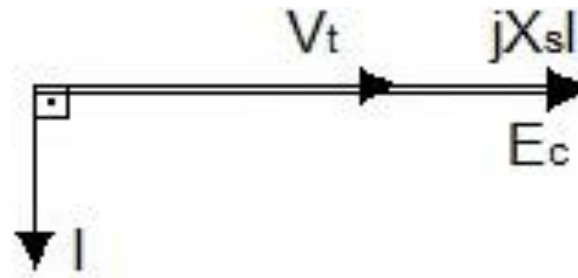
Fonte: o autor

A partir das equações (33) e (35) é possível ver que tanto a potência quanto o torque da máquina síncrona dependem do ângulo de fase entre V e E_c , logo quando ambos estão em fase a potência e torque são nulos. Vale a pena ressaltar que há sim uma pequena potência sendo drenada pelo motor operando como compensador síncrono, pois assim como as máquinas de indução elas possuem perdas nos enrolamentos por aquecimento, rotacionais e por refrigeração.

A variação do ângulo φ depende da carga do próprio motor, pois uma vez que as máquinas síncronas não podem mudar sua velocidade, quando há variação na carga, é o ângulo φ que sofre variação, fazendo com que os valores de potência e torque também sejam alterados como pode ser visto nas equações (33) e (35).

Conclui-se então que, para um motor síncrono funcionar como compensador de reativos, a máquina realmente deve funcionar com o mínimo de carga possível.

Figura 23 – Diagrama fasorial do motor operando sem carga sobre-excitado $E_c > v_t$



Fonte: o autor

$$E_c = kf\phi \quad (38)$$

Onde:

k → Constante que depende dos aspectos construtivos da máquina

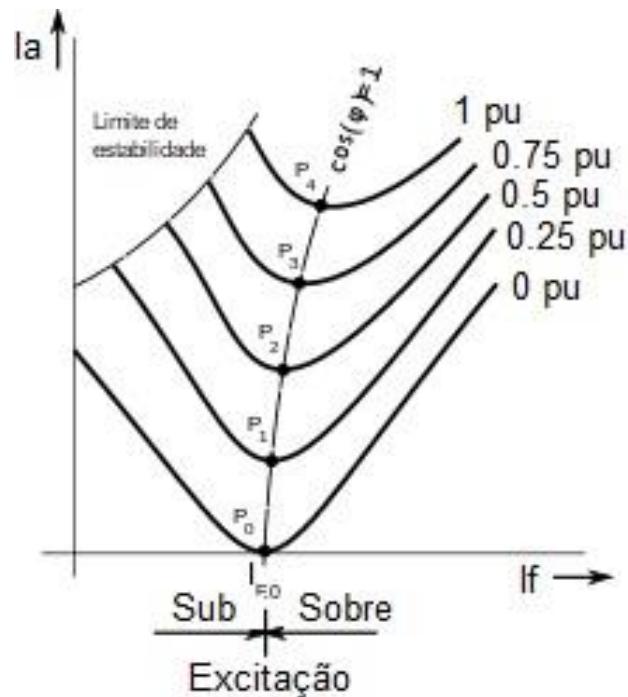
ϕ → Fluxo magnético gerado pelos polos

Como o fluxo magnético da máquina está relacionado à corrente de campo, pode-se controlar a tensão interna através do circuito de campo, sendo assim, podendo-se aumentá-la ou diminuí-la, fazendo com que o motor opere na região de sub ou sobre-excitação. Em complemento da Equação (33), considerando o ângulo φ como 0° , que é a condição da máquina síncrona funcionar como compensador síncrono, a Equação de potência reativa pode ser escrita como:

$$Q = \frac{3V_t(E_c - V_t)}{X_s} \quad (39)$$

Sendo a tensão nos terminais do motor constantes e X_s um parâmetro do motor o único controle que se pode obter é através da corrente CC de excitação que está ligado a tensão interna do motor síncrono E_c . Logo, um motor síncrono operando como compensador de reativos pode ser visto pela rede como uma grande indutância ou capacitância variável, uma vez que a potência ativa desenvolvida por ele é muito baixa, porém com a vantagem de que tanto o banco de capacitores ou indutores só podem ser operados discretamente através de chaveamentos, o que gera a circulação de harmônicos na rede e conseqüentemente diminuição na qualidade da energia na rede.

Figura 24 – Curvas V de potência constante de um motor síncrono



Fonte: o autor

As curvas V de uma máquina síncrona representadas pela Figura 24 mostram que para uma determinada potência ativa, o fator de potência assim como a corrente de armadura, podem ser controlados pela corrente de campo. Para o motor funcionando sobre-excitado, há injeção de energia reativa capacitiva para a rede, bastando verificar a Equação (37) que mostra que para uma tensão interna menor do que a tensão de terminal a potência reativa têm valor negativo.

Motores síncronos superexcitados podem ser usados como compensadores síncronos para realizar a correção do fator de potência de motores de indução de maneira rápida e dinâmica. Em geral, essas máquinas trabalham com carga constante em seu eixo fazendo com que a potência ativa seja constante e aproximadamente nula. Normalmente um motor síncrono usado especificamente para correção de fator de potência possui características especiais tais como maior quantidade de cobre no enrolamento de campo para poder conduzir uma corrente de campo maior e seus rolamentos e seu eixo pode ser menos robusto uma vez que não há necessidade de conjugado para acionar carga.

6. OBTENÇÃO DOS RESULTADOS ATRAVÉS DO MATLAB SIMULINK

Para obtenção de dados foi proposto um estudo de caso, onde o motor de indução trifásico possui as seguintes características:

Tabela 1 – Dados do motor de indução trifásico

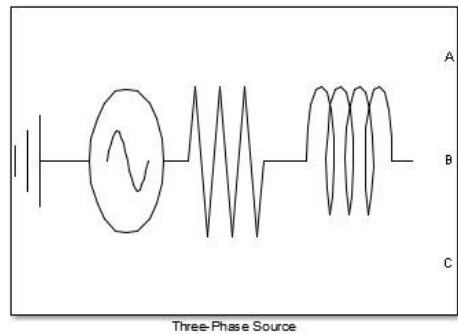
Motor de indução trifásico com rotor tipo gaiola			
Tensão de alimentação	460 V	Corrente nominal	262 A
Frequência	60 Hz	Corrente de partida	2000 A
Potência ativa nominal	149,2 kW	Inércia do rotor	42,23 kgm ²
Conjugado nominal	645 N.m		
Número de pares de polos	2	Escorregamento nominal	1,6%
R_1	0,02175 Ω	L_1	0,0002 H
R_2	0,02700 Ω	L_2	0,0002 H
L_m	0,00875 H		

Fonte: o autor

Motores com essas características podem facilmente ser empregados em vários setores da indústria para realizar diversas tarefas, além disso, para todos os testes foram considerados que o motor de indução estava conectado a uma fonte de alimentação através de um transformador e cabos de alimentação não ideais, porém optou-se por englobar todos os parâmetros da fonte juntamente com os parâmetros do transformador e dos cabos de alimentação. Essa decisão foi tomada após a realização de diversos testes e chegar à conclusão que as simulações estavam sendo muito demoradas através do método Ode45 do Simulink. Apesar de que o próprio Matlab oferece outros métodos para resolução de equações diferenciais mais eficientes do que o Ode45, a solução adotada pelo autor se mostrou muito útil e prática.

Sabe-se que as fontes de energia não ideais possuem uma impedância característica e podem ser vistas em sua forma de circuito como mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Representação de uma fonte não ideal

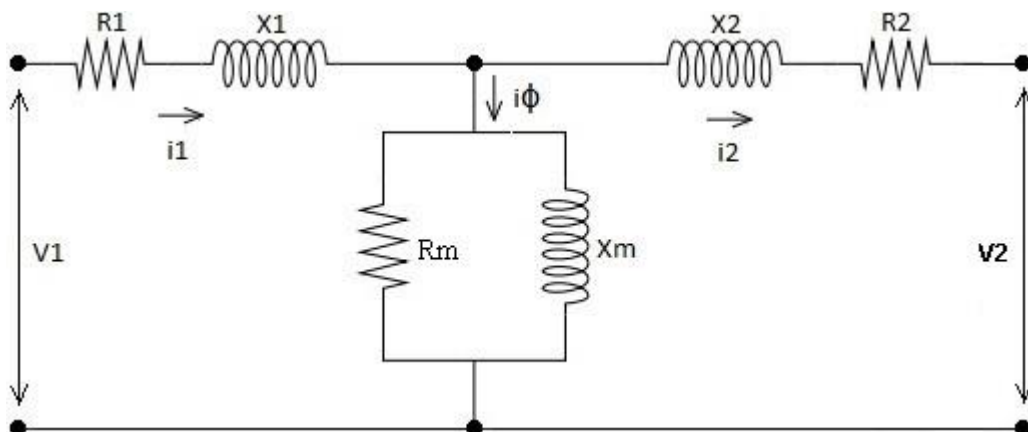


Fonte: o autor

A Figura 25 foi copiada do próprio Simulink do Matlab e através dela observa-se que a fonte possui uma resistência em ohms e uma indutância em henrys associadas a ela. Para esse trabalho, a impedância característica da fonte de alimentação não pode ser desprezada, pois como a corrente na partida do motor de indução é muito grande, uma pequena impedância pode causar uma queda de tensão relevante.

Como se deseja reduzir a quantidade de equações diferenciais a serem resolvidas pelo matlab, optou-se por utilizar o transformador em sua forma de circuito e o mesmo pode ser visto da seguinte forma,

Figura 26 – Circuito equivalente do transformador trifásico (apenas uma fase)



Fonte: o autor

Onde:

$V1$ → Tensão nos terminais do transformador

$i1$ → Corrente de entrada

$R1$ → Resistência do primário referida ao lado secundário

$X1$ → Reatância de dispersão do primário referida ao lado secundário

$i\phi$ → Corrente de magnetização

Rm → Resistência do ramo de magnetização

Xm → Reatância de magnetização

$I2$ → Corrente do secundário

$R2$ → Resistência do secundário

$X2$ → Reatância de dispersão do secundário

Como a fonte de alimentação está do lado primário do transformador e o motor do lado secundário, todos os parâmetros, tanto da fonte quanto do transformador, foram referidos para o lado secundário, onde se encontra o motor.

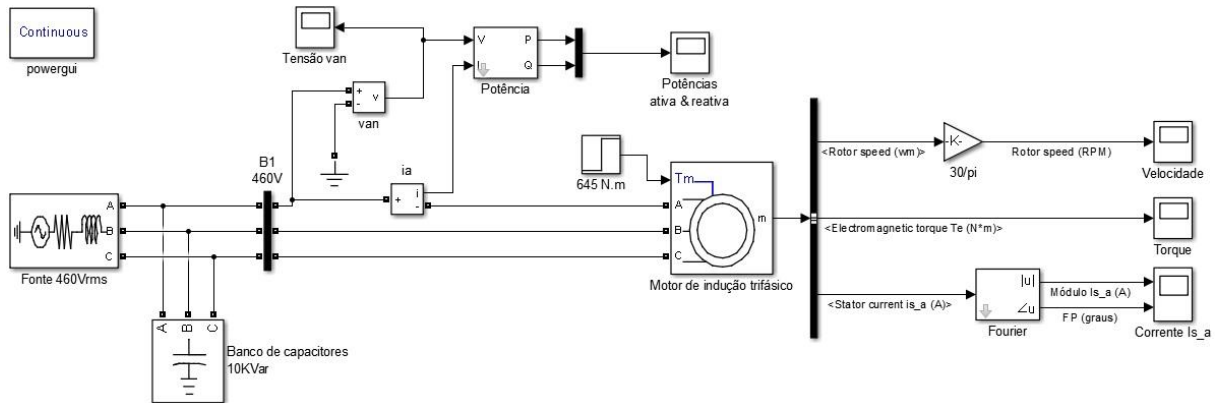
Considerando que, sob carga, a corrente de magnetização do transformador é insignificante e todos os parâmetros da fonte, dos cabos de alimentação e do transformador estão adequadamente referidos ao lado secundário do transformador, pode-se somar essas impedâncias simplificando o circuito final englobando todos os outros parâmetros juntamente com os da fonte de alimentação como mostrado na Figura 24.

Para o processo de simulação foi utilizada uma fonte de alimentação de 460Vrms fase-fase com uma resistência e reatância interna de 0,004 ohms e 0,029 ohms respectivamente, isso equivale a uma impedância de módulo igual a 0,029 ohms aproximadamente.

6.1. SIMULAÇÃO DO MOTOR PARTINDO DIRETAMENTE DA REDE

Para efeitos de comparação será usado o modelo do motor partindo diretamente da rede, pois ao realizar essa simulação será possível levantar dados característicos importantes da máquina durante seu processo de funcionamento.

Figura 27 – Esquemático de ligação do motor de indução partindo diretamente na rede

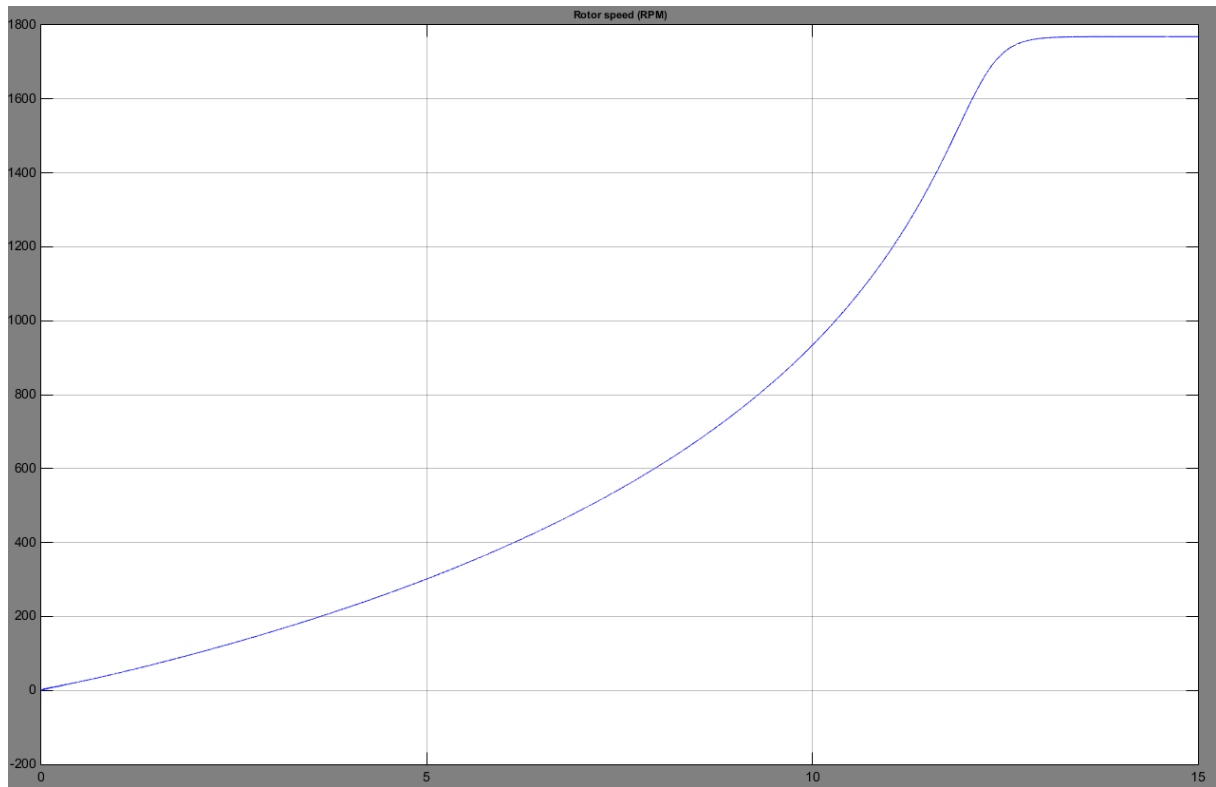


Fonte: o autor

Como se pode observar através do modelo, o motor foi acionado com uma carga com o perfil de torque constante de 645 N.m e alimentado em seus terminais por uma fonte não ideal de 460 Vrms. O Simulink permite que sejam feitos vários tipos de medições diretamente do terminal 'm' como mostrado na Figura 27. Para esse trabalho três características foram destacadas, são elas: A velocidade do rotor, o torque elétrico, e a corrente no estator. Além dessas, foi necessário realizar outras medições diretamente da rede, que foram a tensão de fase-neutro e a potência em cada fase.

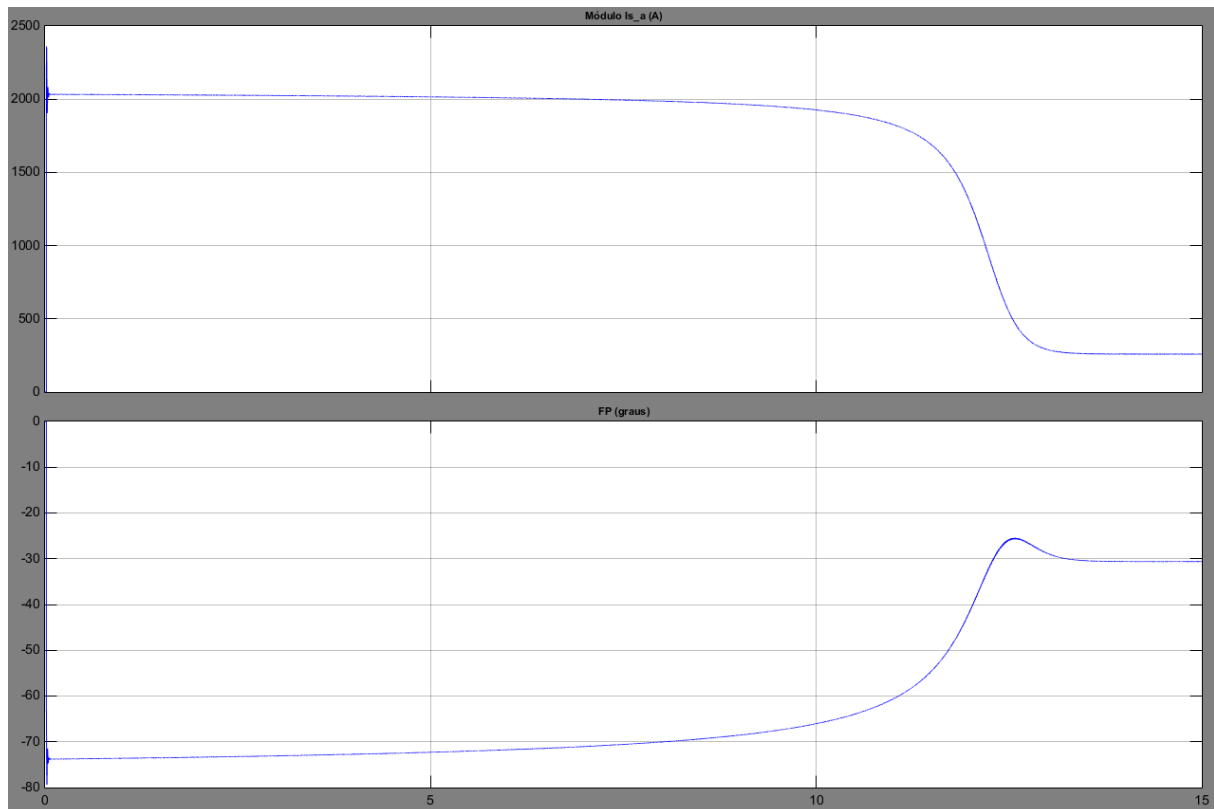
A Figura 28 mostra a curva de aceleração do motor de indução trifásico em função do tempo, para a situação apresentada. Já a Figura 29 apresenta a corrente em uma fase e o ângulo de fator de potência, durante a aceleração do motor.

Figura 28 – Curva de aceleração do motor de indução trifásico



Fonte: o autor

Figura 29 – Corrente e ângulo de fator de potência durante a aceleração



Fonte: o autor

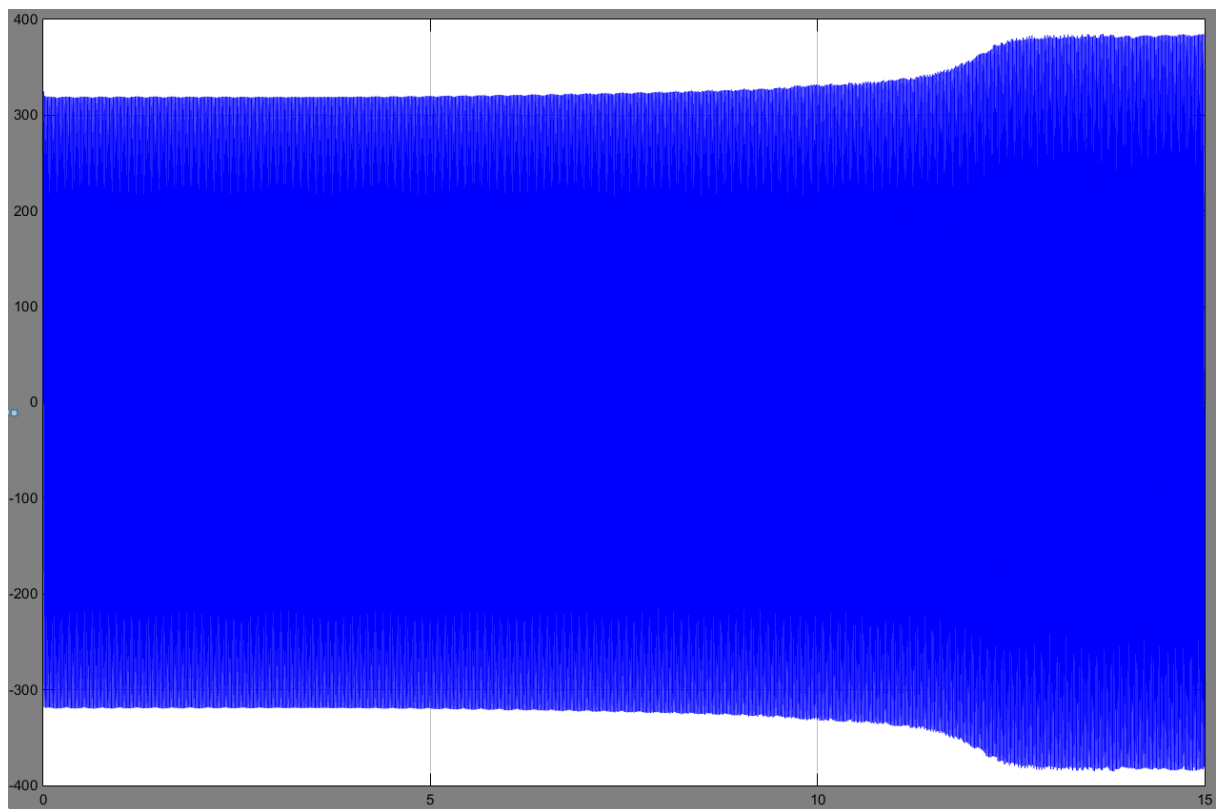
A velocidade de operação é atingida em 13,5 segundos, e é de 1768 Rpm. Na Figura 29 se observa que a corrente do motor decresce durante todo o período de aceleração até atingir seu valor nominal (caso o motor esteja configurado para operar com seus parâmetros nominais), ou seja, quanto maior for o tempo de aceleração do motor, maior será o tempo em que o mesmo irá operar com sobrecorrente. Correntes altas na partida do motor de indução podem causar diversos problemas, como por exemplo: afundamentos de tensão devido ao mau dimensionamento de fontes ou transformadores, quedas de tensão e necessidade de superdimensionamento dos transformadores e condutores.

No momento da partida, como explicado nos capítulos anteriores desse trabalho, a máquina possui um fator de potência muito baixo, nesse caso igual a 0,28 (74° indutivo), e uma corrente de módulo aproximadamente igual a 2030 A. Isso significa que ao compensar esses excessos de reativos, pode-se causar um alívio substancial no barramento onde esse motor está conectado, pois apesar do motor necessitar dessa energia para entrar em funcionamento a rede não precisa sentir o

impacto. Em regime permanente o motor atinge um fator de potência de 0,86 (31° indutivos) e uma corrente de módulo aproximadamente igual a 259 A.

Como visto, o motor funciona durante todo o processo de aceleração com sobrecorrente, o que causa uma queda de tensão significativa no barramento de conexão, como pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 – Envoltória da tensão da fase A durante o processo de aceleração



Fonte: o autor

O menor nível de tensão obtido foi logo na partida do motor, chegando a 319 V de pico fase-neutro (390 Vrms) e então tendo seu nível normalizado quando o motor entrou em regime permanente com a tensão de 375 V de pico fase-neutro (460 Vrms). O afundamento de tensão durante a partida representa aproximadamente 15% da tensão de alimentação no barramento.

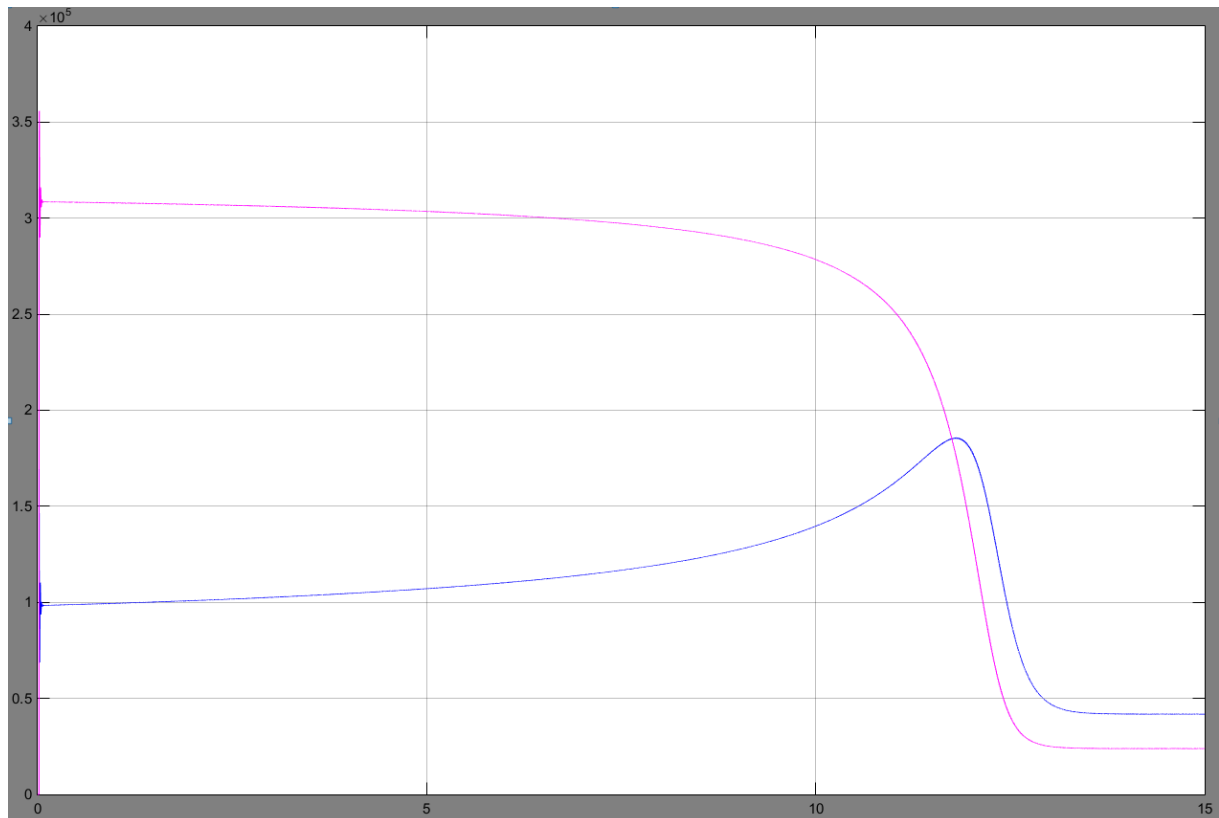
Do ponto de vista do próprio motor, o grande problema causado pelo afundamento da tensão no barramento que o alimenta é que como ele recebe um nível menor de tensão (abaixo do valor nominal) ele acaba desenvolvendo menos

conjugado e conseqüentemente também irá acelerar mais devagar causando sobrecorrentes por períodos maiores. Como visto diversas vezes no desenvolvimento desse trabalho, o torque do motor de indução trifásico depende diretamente do quadrado da tensão, logo pequenas variações de tensão podem causar impactos significativos no torque dos motores de indução.

Vale a pena ressaltar que de acordo com a NBR 5410/04 o afundamento máximo de tensão permitido é 10% em relação à tensão nominal. Sendo assim esse motor, por norma, não pode partir conectado diretamente na rede.

Através da corrente e tensão em cada fase foi possível construir os gráficos da potência ativa e reativa durante todo o processo de aceleração do motor de indução (valores por fase), mostrados na Figura 31.

Figura 31 – Potência ativa (Em azul) e potência reativa (Em rosa) durante o processo de aceleração



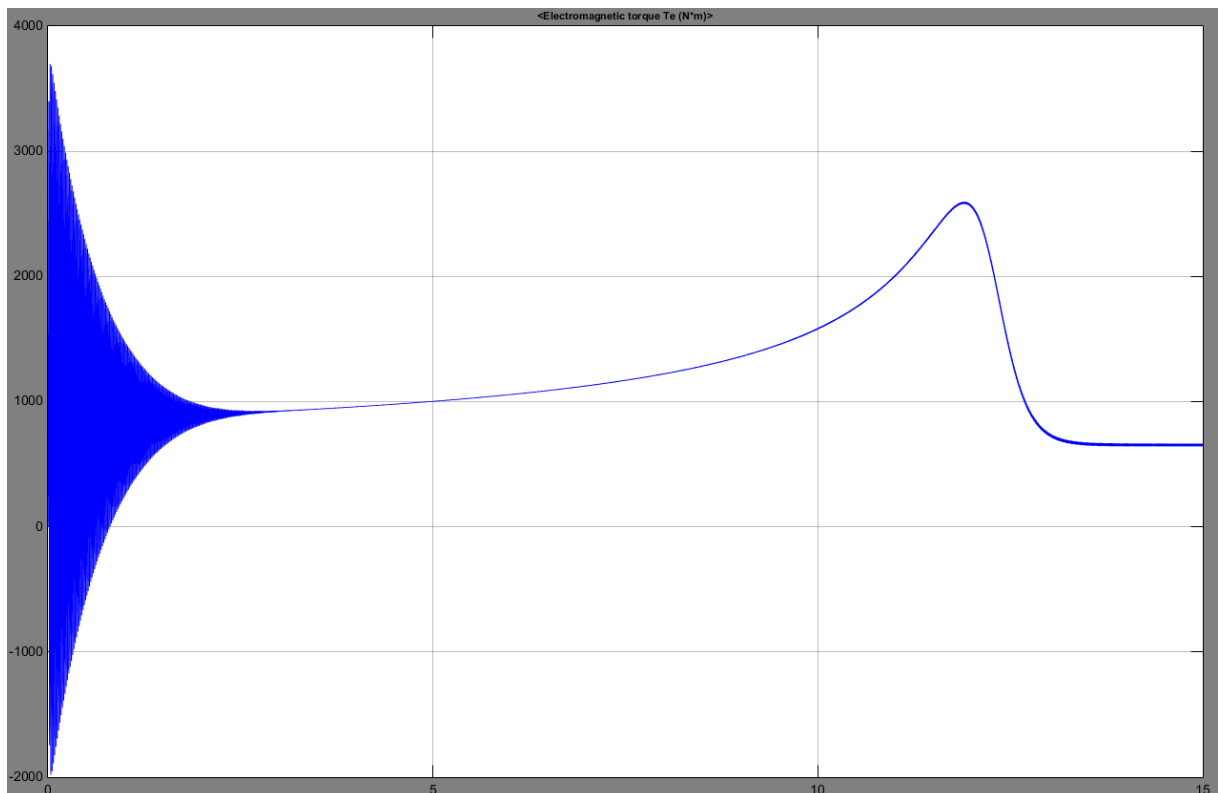
Fonte: o autor

Na partida, o motor consome aproximadamente 3x310 kvar e 3x100 kW, e à medida que o motor vai ganhando velocidade a potência reativa vai decrescendo até

chegar no limite de 3x24 KVar necessários para manter o motor funcionando. Já a potência ativa atinge seu valor máximo de 186 KW em aproximadamente 11.8 segundos e, a partir de então, decresce até atingir seu valor nominal por fase que é de aproximadamente 3x42.5 KW.

Pela curva da Figura 32 pode-se avaliar o conjugado desenvolvido pelo motor durante sua operação, porém não é possível determinar ao certo o torque máximo no momento partida do motor devido aos transitórios. Estima-se que esteja acima de 900 N.m para o caso da partida direta. O torque máximo obtido por essa máquina foi de 2590 N.m em aproximadamente 11,8 segundos de funcionamento e seu torque em regime permanente foi de 645 N.m.

Figura 32 – Torque desenvolvido pela máquina durante a aceleração



Fonte: o autor

6.2. SELEÇÃO E ANÁLISE DO COMPENSADOR SÍNCRONO

Como explicado anteriormente. A máquina síncrona pode funcionar como um capacitor variável caso operada de maneira correta, pois pode fornecer potência reativa constantemente enquanto consome muito pouca potência ativa no processo. Para este estudo, um compensador síncrono será conectado em paralelo com o motor de indução com o objetivo de compensar toda a potência reativa que essa máquina consumir.

Antes de realizar a simulação foi necessário escolher uma máquina síncrona para funcionar como compensador. Como regra, o compensador síncrono deve possuir capacidade de fornecer toda a potência reativa que se deseja compensar e, além disso, a inércia do motor deve ser a menor possível para que acelere o mais rápido possível. Como visto na Figura 31, a potência reativa máxima que se deseja compensar acontece logo na partida do motor de indução, e é de 3x310kvar.

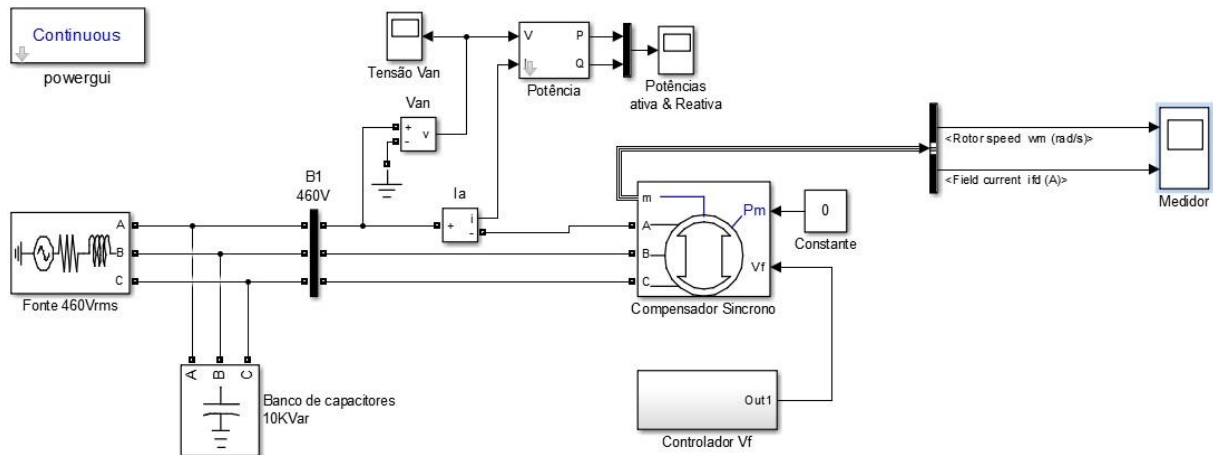
Tabela 2 – Parâmetros do compensador síncrono

Máquina síncrona trifásica			
Tensão de alimentação	460 V	Velocidade síncrona	1800 Rpm
Potência nominal	1,558 MVA	Frequência	60 Hz
Inércia do rotor	23,01 kgm ²		

Fonte: o autor

A máquina usada como compensador foi retirada da própria biblioteca do Simulink, o modelo escolhido foi a máquina síncrona de 1,558 MVA. Abaixo segue o esquema de ligação do compensador síncrono à rede.

Figura 33 – Esquemático de ligação do compensador síncrono conectado diretamente na rede



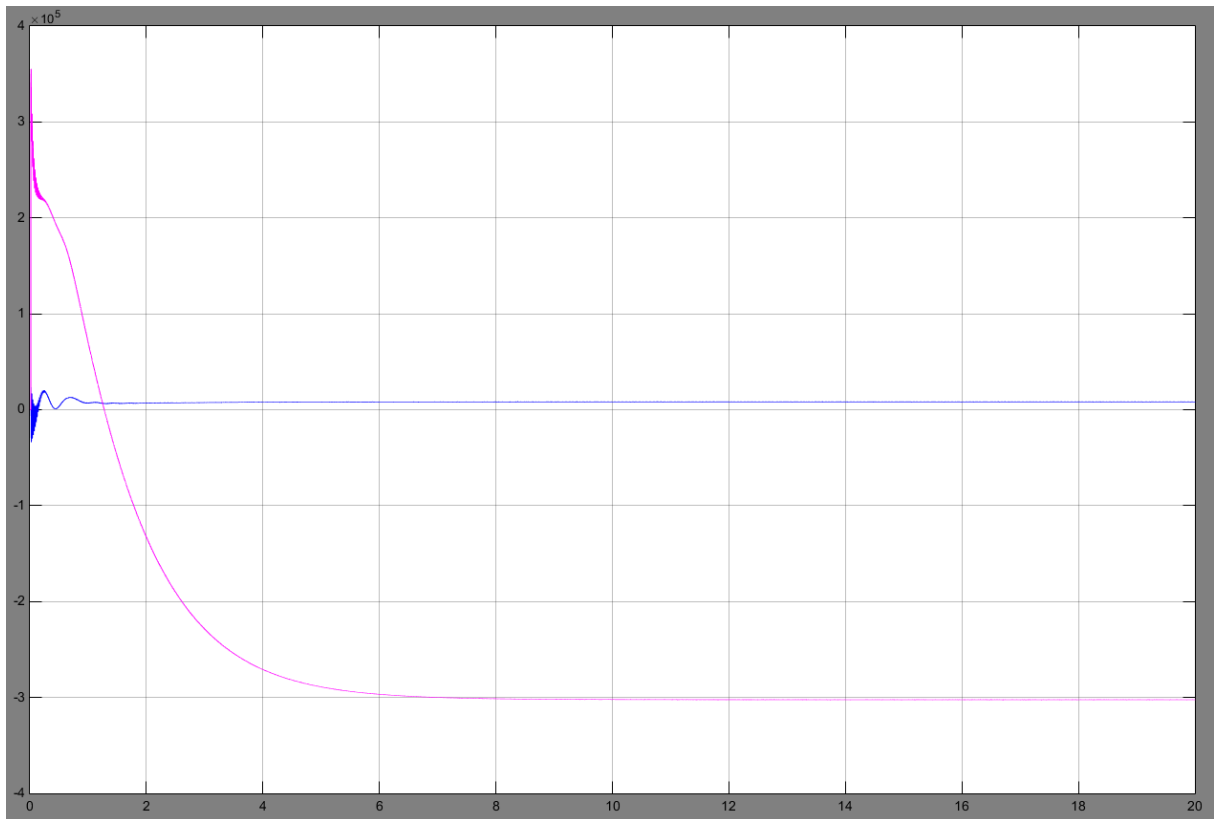
Fonte: o autor

Na partida do motor de indução o mesmo absorve 3×310 kvar indutivos da rede e, à medida que o motor acelera, esse valor reduz para 3×24 kvar, permanecendo constante a partir disso. Sendo assim, o objetivo do compensador síncrono é injetar na partida do motor de indução 3×310 kvar capacitivos e, quando o motor entrar em regime permanente, fornecer 3×24 kvar capacitivos complementares para melhorar o fator de potência no barramento onde as máquinas serão conectadas.

Através da variação da tensão do enrolamento de campo do compensador síncrono foi determinado que, para gerar 3×310 kvar capacitivos o compensador síncrono deveria ficar no modo sobre excitado através de uma tensão de 1,19 pu em seu enrolamento de campo. Para essa tensão a corrente de campo é de 2500 A.

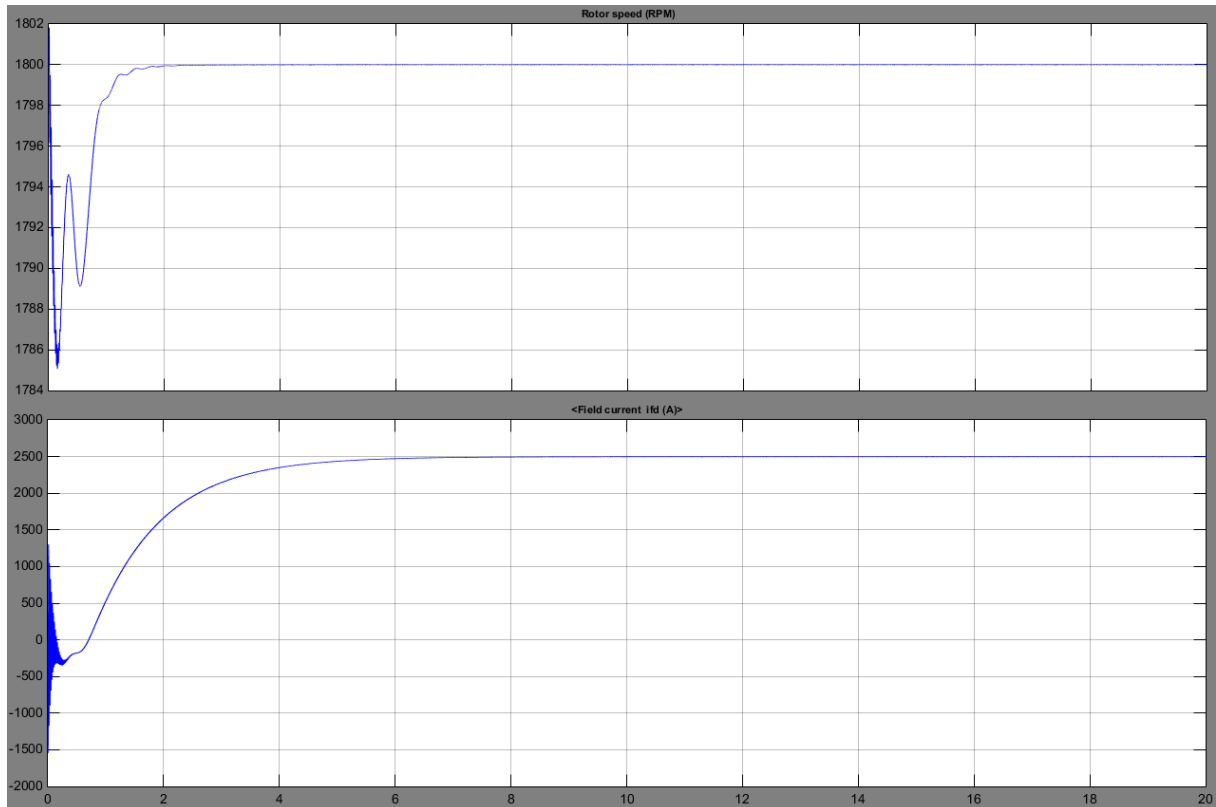
A máquina síncrona é posta a girar sem excitação de campo para atingir o sincronismo. Quando a excitação é aplicada, existe um transitório no comportamento da máquina até a excitação alcançar o valor final. A Figura 34 mostra as potências ativa e reativa quando é conectada a excitação informada, e a Figura 35 mostra o transitório na velocidade e na corrente de excitação quando o enrolamento de campo é alimentado.

Figura 34 – Curva de potência ativa (Azul) e reativa (Rosa) do compensador síncrono quando o enrolamento de campo é alimentado



Fonte: o autor

Figura 35 – Características do compensador síncrono quando o enrolamento de campo é alimentado.



Fonte: o autor

Dois conclusões importantes podem ser tiradas dos gráficos das Figuras 34 e 35. A primeira diz respeito à potência ativa consumida pela máquina síncrona, que é de $3 \times 6,5 \text{ kW}$, ou seja, a máquina não está funcionando como um capacitor puro já que precisa de potência ativa para suprir as perdas de seu próprio funcionamento. A segunda conclusão é que se verifica que a variação da potência reativa gerada pelo compensador síncrono não acontece instantaneamente após a excitação do circuito de campo, deve haver tempo suficiente para que o mesmo responda adequadamente. Esse segundo fato sugere que antes da partida do motor de indução o compensador síncrono já deva estar ligado a tempo suficiente para que a corrente de campo já tenha atingido seu estado de regime permanente, sendo então o compensador capaz de fornecer toda a potência reativa desejada. Pelo gráfico observa-se que o compensador precisa de aproximadamente 6 segundos para estabilizar a corrente de campo. Isso é consequência da constante de tempo elétrica do enrolamento de campo.

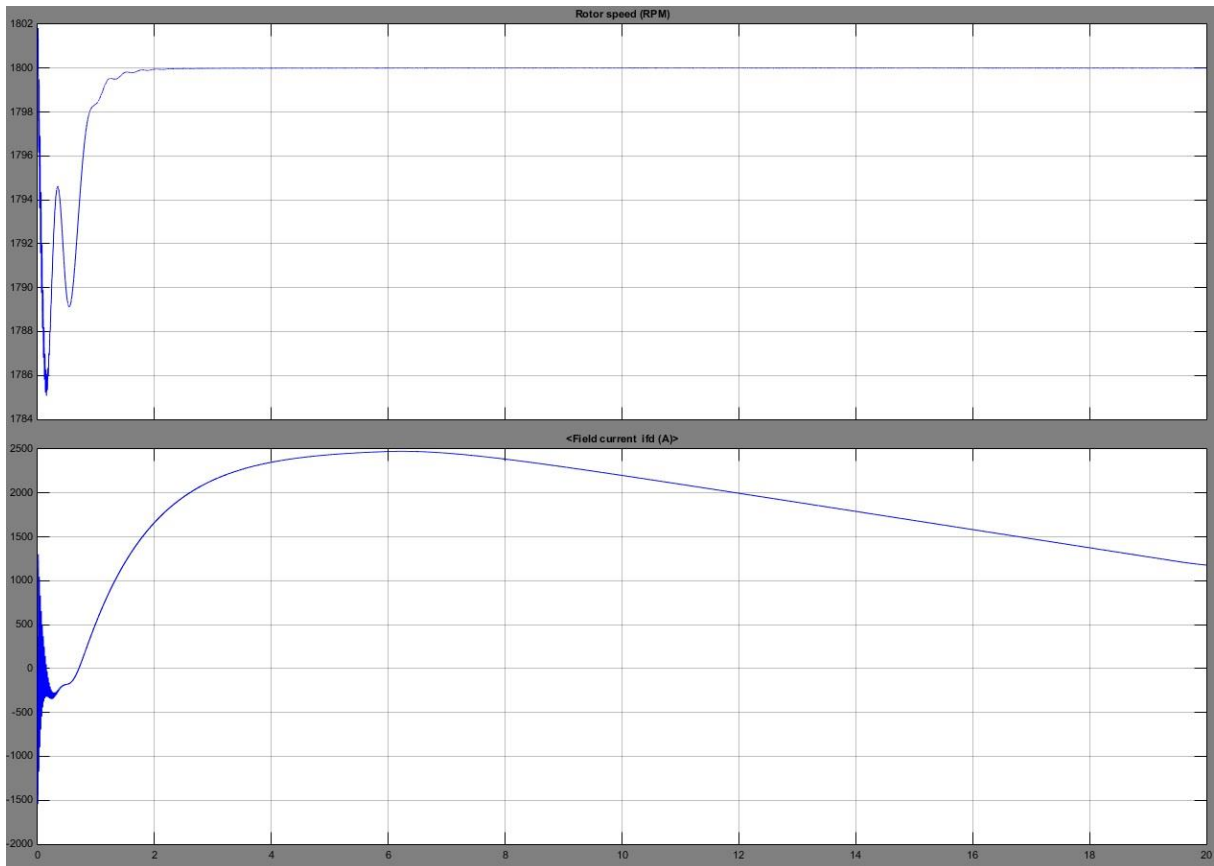
6.3. SIMULAÇÃO DO CONJUNTO MOTOR DE INDUÇÃO E COMPENSADOR SÍNCRONO CONTROLADO ATRAVÉS DE UM CONTROLE LINEAR DE TENSÃO

Sabendo que o compensador síncrono precisa de uma tensão em seu enrolamento de campo de 1,19 pu para fornecer 3x310 kvar capacitivos e 0,524 pu para produzir os 3x24 kvar complementares foi escolhido, como primeira tentativa, um controlador linear sem realimentação como mostrado nas equações abaixo.

$$\begin{cases} V_f = -0,0000t + 1,190 [pu] \text{ para } 0 < t \leq 6,00 \text{ segundos} \\ V_f = -0,0493t + 1,190 [pu] \text{ para } 6 < t < 13,5 \text{ segundos} \\ V_f = -0,0000t + 0,524 [pu] \text{ para } t > 13,5 \text{ segundos} \end{cases} \quad (40)$$

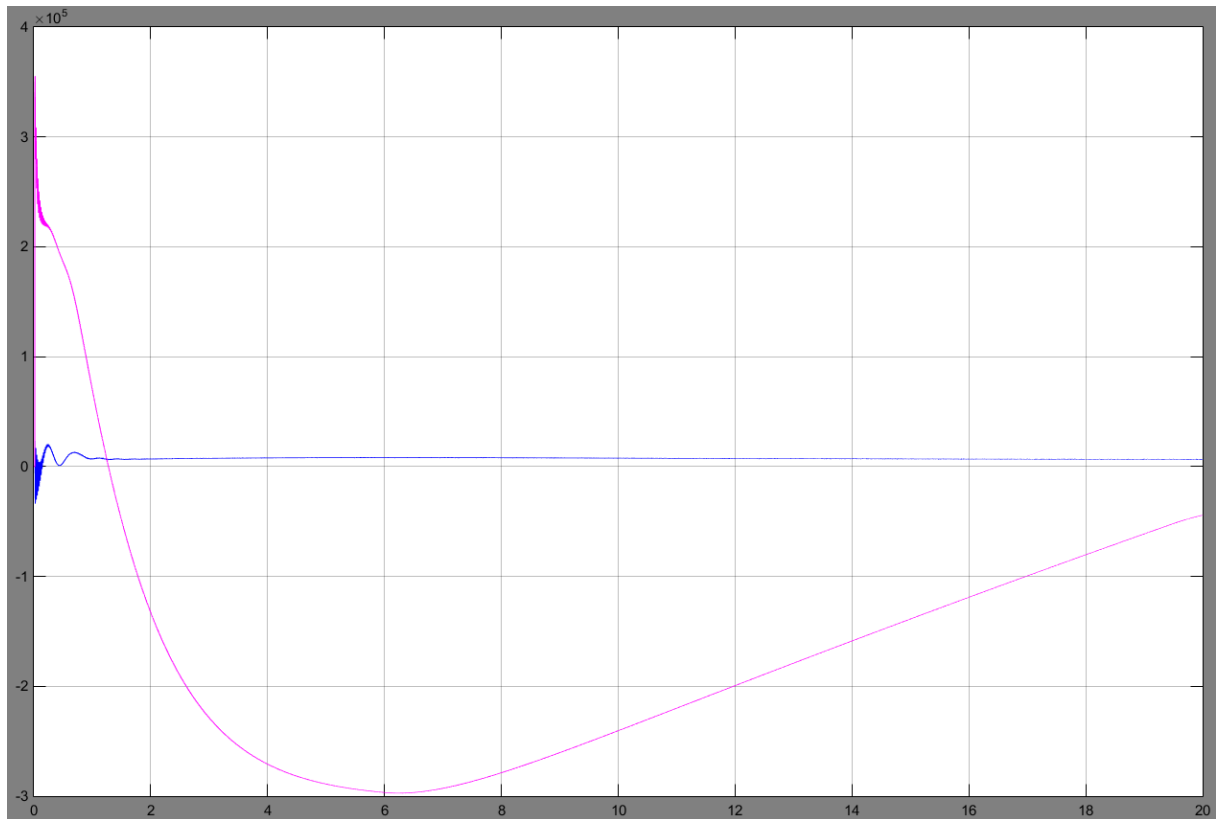
Vale a pena ressaltar que um controle desse tipo só é útil para situações onde a carga tem o mesmo comportamento sempre. Para cargas que possuem comportamento variável ou para atender vários motores de uma só vez, sugere-se um controlador do tipo realimentado pelo fator de potência do motor de indução. Inicialmente foi avaliado o comportamento do compensador com a lei de controle da excitação apresentada na Equação 40. O comportamento da corrente de excitação pode ser visto na Figura 36, e das potências ativa e reativa na Figura 37.

Figura 36 – Características de velocidade e corrente de campo do compensador síncrono funcionando com corrente de campo variável através das equações 38



Fonte: o autor

Figura 37 – Curva de potência ativa (Azul) e reativa (Rosa) do compensador síncrono com corrente de campo variável através da Equação 38



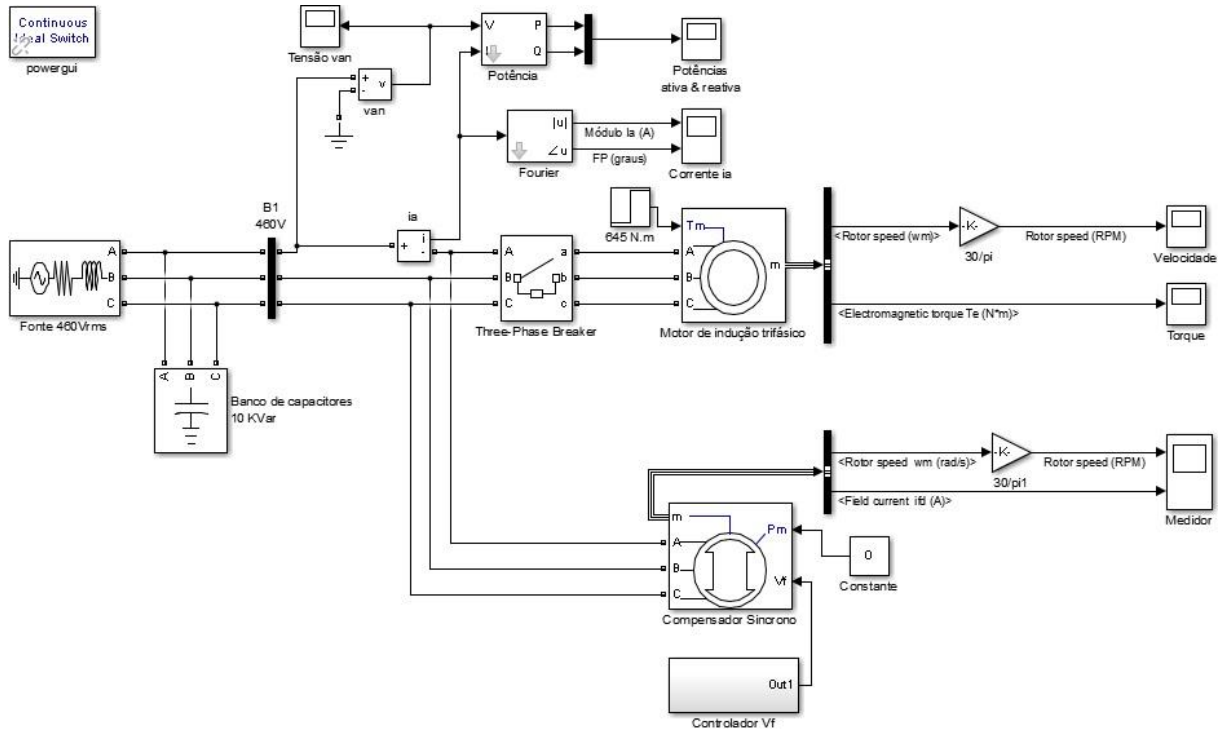
Fonte: o autor

Para uma análise econômica, deve-se levar em consideração que, para o compensador síncrono manter o fornecimento dos 3×24 kvar capacitivos enquanto o motor de indução estiver operando em regime permanente, ele irá precisar de uma corrente de 1185 A em seu enrolamento de campo.

Nas curvas da Figura 37 pode-se observar que a potência reativa, a partir de 6 segundos, decresce suavemente até atingir o valor desejado de 3×24 KVar capacitivo, sendo que nesse ponto o enrolamento de campo ficará constantemente sendo alimentado por uma tensão de aproximadamente 0,524 pu para correção do fator de potência no barramento enquanto o motor de indução estiver em operação.

Por fim, implementou-se em simulação o circuito das duas máquinas operando conjuntamente, como mostrado na Figura 38.

Figura 38 – Máquina de indução e compensador síncrono ligados a rede

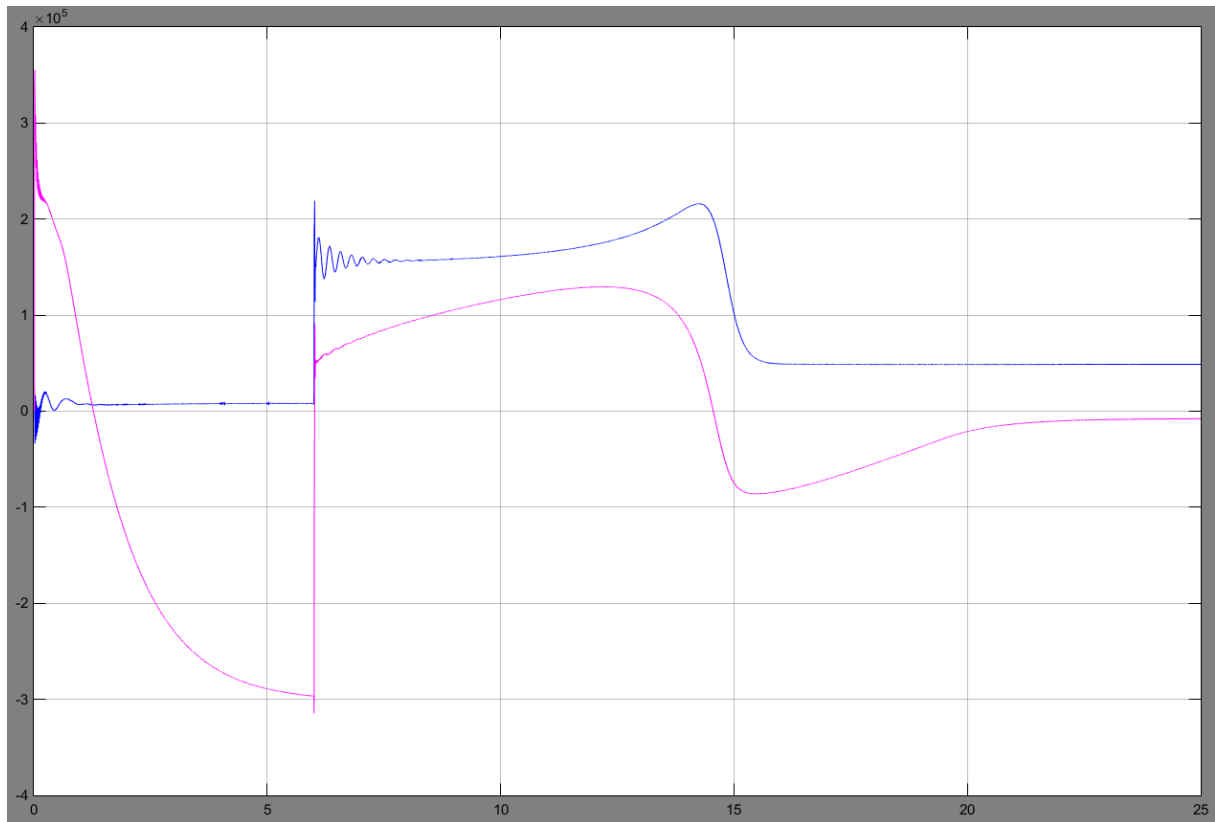


Fonte: o autor

Antes de ligar as máquinas em paralelo foi necessário realizar dois ajustes para que fosse possível realizar todas as medidas corretamente. O primeiro foi inserir uma chave antes da máquina de indução para que a mesma seja ligada apenas quando o compensador síncrono estiver ligado tempo suficiente para que seja capaz de fornecer a potência reativa que se deseja compensar. O segundo ajuste foi o reposicionamento do medidor de corrente, para que esse meça corretamente a corrente que está circulando na rede.

Os resultados de simulação estão apresentados a seguir. A Figura 39 mostra a curva de potência ativa (azul) e reativa (rosa) do sistema motor de indução e compensador síncrono. O motor de indução é conectado em 6s.

Figura 39 – Curva de potência ativa (Azul) e reativa (Rosa) do sistema motor de indução e compensador síncrono



Fonte: o autor

Na Figura 38 observa-se que de 0 a 6 segundos apenas o compensador síncrono estava ligado, sendo que o pico de energia reativa gerada chegou a aproximadamente 310 kvar capacitivo como desejado. A partir de então o motor de indução foi ligado, e a energia reativa inverteu de capacitiva para indutiva quase que instantaneamente indo de -300 kvar para 50 kvar e continuou aumentando até atingir o pico de 125 kvar indutivo em aproximadamente 12,2 segundos. Após isso a potência reativa caiu até voltar a ser capacitiva atingindo outro máximo de 80 kvar capacitivos em 15,5 segundos. A partir de então a potência reativa tendeu a zero em 23 segundos de funcionamento de todo processo.

Dependendo da qualificação técnica do observador, pode-se pensar que não houve compensação de reativos ou que o compensador síncrono não é capaz de manter um controle da quantidade necessária de reativos para a partida do motor de indução. Isso não é verdade, pois nesse caso o problema encontra-se no controle da corrente de campo do compensador síncrono, como mostrado a seguir. A Figura 40

apresenta a envoltória da tensão da fase A durante o processo de aceleração do sistema.

Figura 40 – Envoltória da tensão da fase A durante o processo de aceleração do sistema

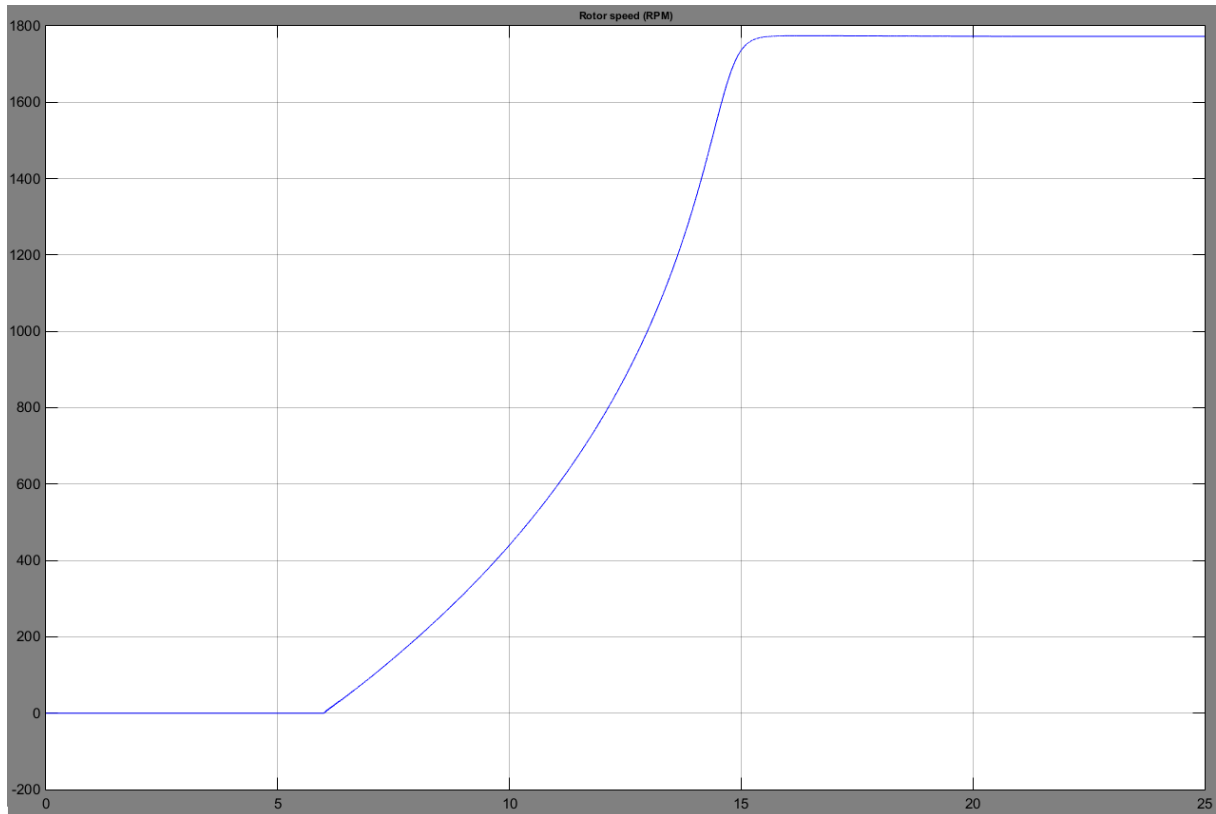


Fonte: o autor

Enquanto o compensador síncrono estava acelerando houve um aumento da tensão no barramento em relação a tensão nominal. O pico de tensão foi atingido aos 6 segundos e foi de 414 V pico fase-neutro (507 Vrms, fase-fase). Isso equivale a um aumento percentual de aproximadamente 10% da tensão nominal. Observa-se também que, após o motor de indução partir, ainda houve um afundamento de tensão, mas menor do que o caso considerando a partida direta na rede. Logo na partida do motor de indução o afundamento de tensão chega a 363 V de pico fase-neutro (445 Vrms). Esse afundamento vai aumentando progressivamente até 13,8 segundos e atinge o valor de 338 V de pico fase-neutro (414 Vrms, fase-fase), que equivale a um afundamento de 10% da tensão nominal. Após isso a tensão vai aumentando até atingir seu valor nominal, e se mantém constante durante o restante do funcionamento do motor de indução.

A Figura 41 mostra, para a situação analisada, a aceleração do motor de indução.

Figura 41 – Característica de aceleração do motor de indução



Fonte: o autor

Observa-se que após a correção parcial do afundamento de tensão, o motor de indução acelera mais rápido do que considerando a ligação direta da rede, levando somente 9,5 segundos para ir de zero até a sua velocidade nominal. Ou seja, houve uma redução de aproximadamente 30% no tempo de aceleração do motor de indução.

Foi constatado que esse primeiro resultado, apesar de não ter atendido completamente as expectativas, melhorou a resposta do sistema. A resposta insatisfatória ocorreu devido a duas previsões erradas do projeto inicial do controlador. A primeira previsão errada foi pensar que um simples controlador linear seria capaz de manter os níveis de potência reativos do barramento em zero, e a segunda previsão errada foi não levar em consideração que após a compensação o afundamento de tensão iria diminuir e, conseqüentemente, mudar todas as características de consumo de reativos do motor de indução. Simulando novamente a partida direta com uma fonte

ideal e tensão nominal, foi constatado que ao invés de 3x310 kvar o motor de indução absorve 3x425 kvar. Sendo assim, houve a necessidade de projetar outro controlador.

6.4. SIMULAÇÃO DO CONJUNTO MOTOR DE INDUÇÃO E COMPENSADOR SÍNCRONO CONTROLADO ATRAVÉS DE UM CONTROLE DE TENSÃO CONTÍNUA E VARIÁVEL

Levando em consideração o sucesso limitado do controlador projetado anteriormente, um novo controlador foi projetado. Foram considerados mais passos em relação ao projeto anterior para manter a energia reativa no barramento o mais próximo possível de zero. Para acelerar a produção de 425 kvar pelo compensador síncrono, foi criado no controlador um bloco extra com passos adicionais que podem ser vistos na Equação 41.a. Porém, deve-se sempre levar em conta a capacidade do enrolamento de campo da máquina síncrona antes de submetê-lo a correntes elevadas, pois isso pode danificar o condutor do enrolamento de campo.

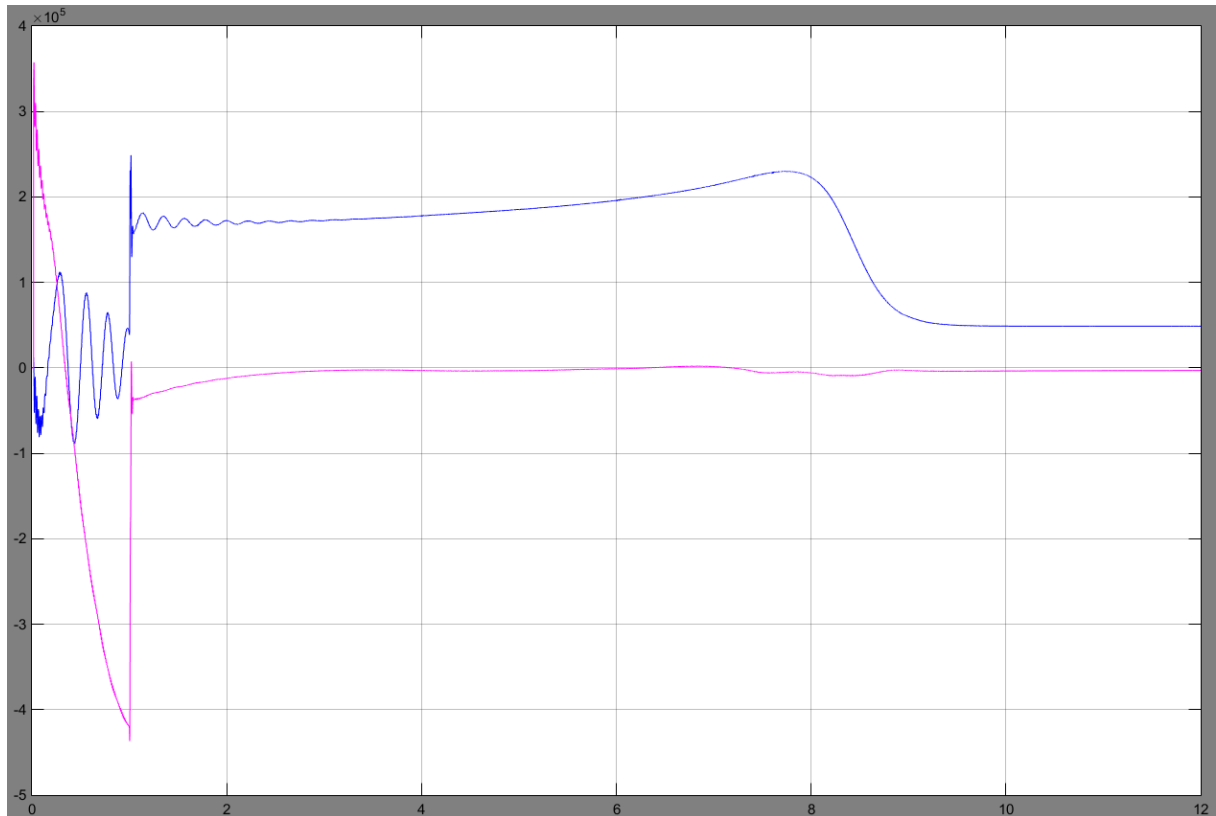
$$\begin{cases} V_f = -3.2318t + 5.000 [pu] \text{ para } t < 1 \text{ segundo} \\ V_f = -0.0000t + 1.445 [pu] \text{ para } t \geq 1 \text{ segundo} \end{cases} \quad (41.a)$$

Já para manter a potência reativa sempre o mais próximo de possível zero de maneira contínua, adota-se a Equação 41.b, onde se nota que esse novo controlador possui vários passos.

$$\begin{cases} V_f = -0.05t + 1.445 [pu] \text{ para } 4.00 < t < 5.00 \text{ segundos} \\ V_f = -0.08t + 1.395 [pu] \text{ para } 5.00 < t < 6.00 \text{ segundos} \\ V_f = -0.18t + 1.315 [pu] \text{ para } 6.00 < t < 7.00 \text{ segundos} \\ V_f = -0.29t + 1.135 [pu] \text{ para } 7.00 < t < 7.40 \text{ segundos} \\ V_f = -1.39t + 1.019 [pu] \text{ para } 7.40 < t < 7.60 \text{ segundos} \\ V_f = -1.15t + 0.741 [pu] \text{ para } 7.60 < t < 8.25 \text{ segundos} \\ V_f = +0.75t + 0.0065 [pu] \text{ para } 8.25 < t < 8.94 \text{ segundos} \\ V_f = 0.524 [pu] \text{ para } t > 8.94 \text{ segundos} \end{cases} \quad (41.b)$$

Apesar de possuir muitos passos a resposta é muito suave, pois o controle é contínuo. Esse tipo de controle poderia ser facilmente implementado por um PLC. A resposta do conjunto com o novo controle está apresentada na Figura 42.

Figura 42 – Resposta final da Curva de potência ativa (Azul) e reativa (Rosa) de todo o sistema



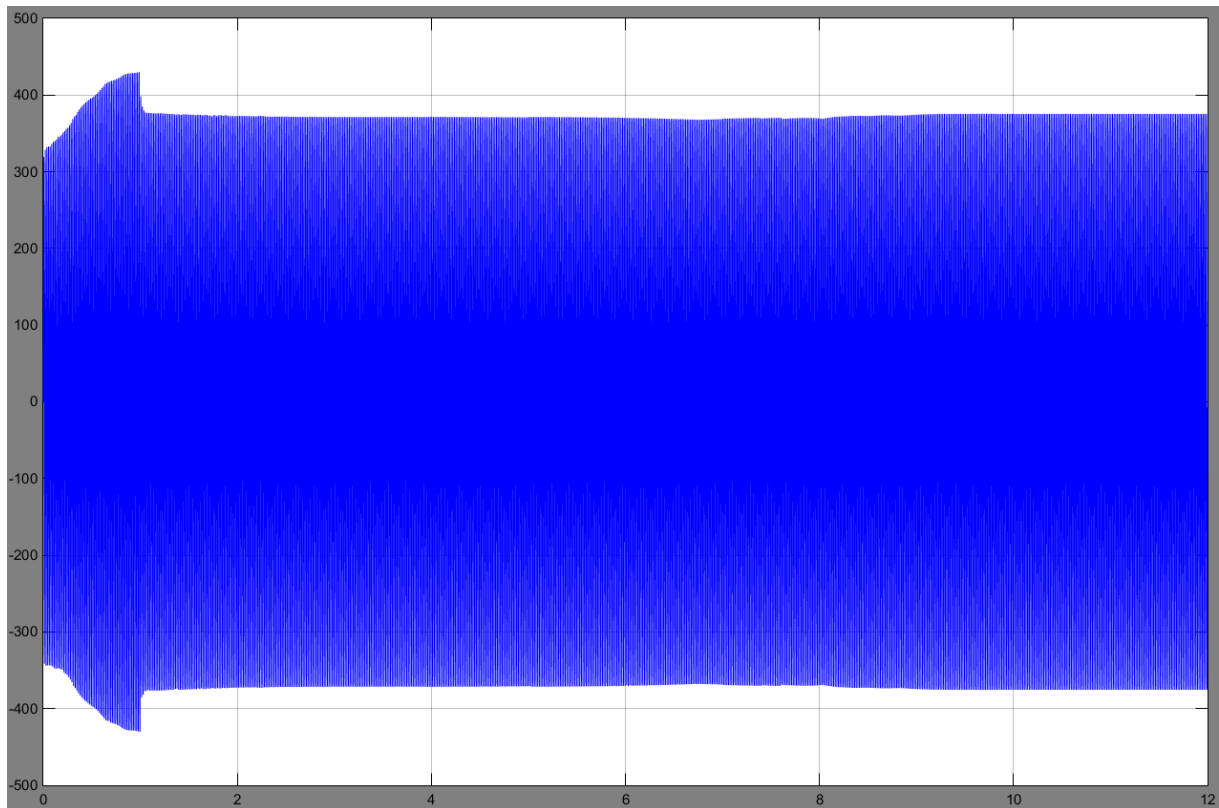
Fonte: o autor

Como pode ser visto através da Figura 42, o compensador síncrono além de conseguir reduzir a quantidade de energia reativa indutiva durante a partida do motor de indução, conseguiu também manter o fator de potência em aproximadamente zero em todo barramento conectado a ele durante todo o processo de aceleração do motor de indução.

Observa-se que, pela estratégia adotada, pouco antes do motor de indução partir, a rede estava com excesso de potência reativa capacitiva. O compensador síncrono precisa de tempo para alcançar a potência reativa necessária. O tempo necessário com sobrecarga de energia reativa capacitiva na rede é o mesmo que o compensador síncrono leva para atingir a potência reativa máxima que se deseja compensar na partida do motor de indução.

A Figura 43 mostra o perfil de tensão instantânea com a nova proposta de controle da excitação.

Figura 43 – Resposta final da envoltória da tensão da fase A durante o processo de aceleração do sistema

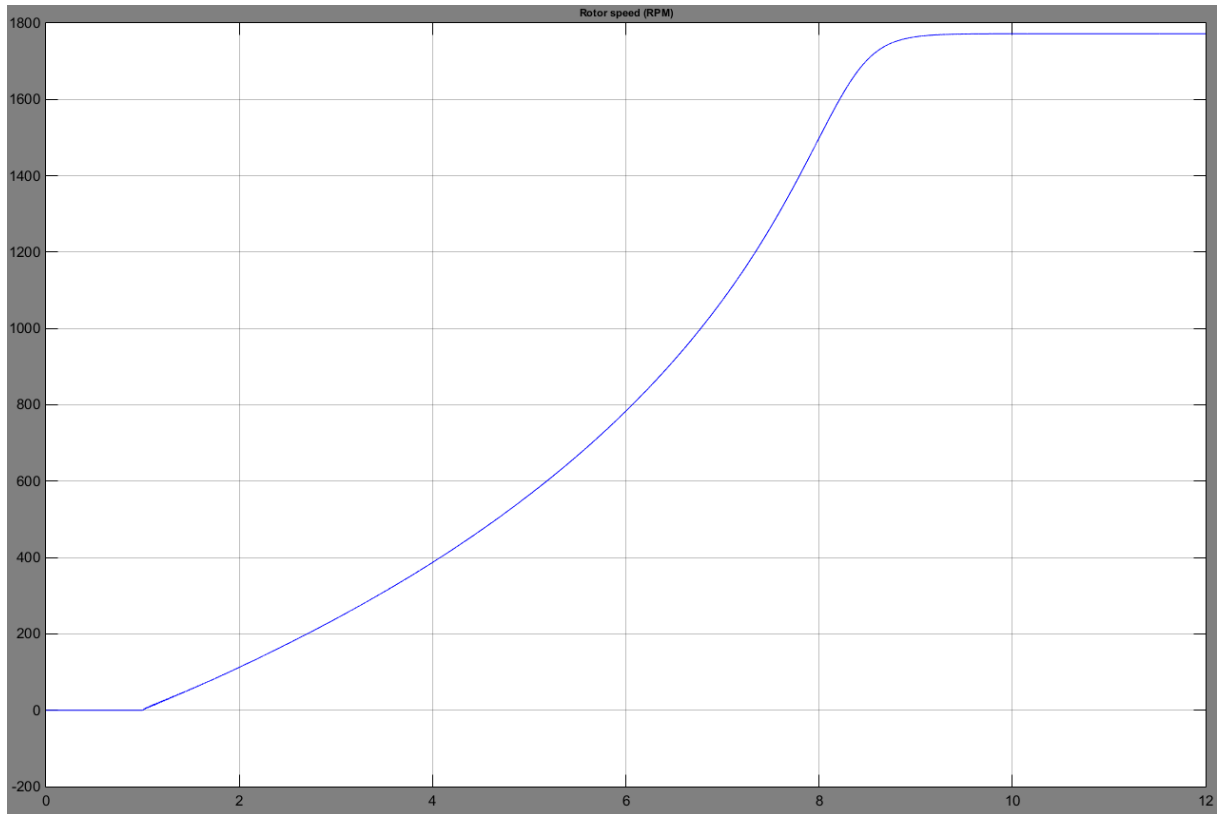


Fonte: o autor

Duas observações podem ser feitas através da curva da Figura 43. Antes do motor de indução partir a tensão na rede atingiu o pico de 431 V (527 Vrms, fase-fase), isso acontece porque antes da partida da máquina de indução o compensador síncrono estava funcionando como um capacitor fornecendo excesso de potência reativa capacitiva para rede, fazendo com que a tensão no barramento fosse elevada. Recomenda-se que esse tipo de situação seja o mais breve possível, pois outros elementos ligados ao mesmo barramento irão sofrer o impacto causado por essa elevação de tensão. A segunda observação é que, como todo o excesso de reativos foi retirado da rede logo após a partida do motor de indução, a tensão no barramento se manteve bem próximo ao valor nominal 375 V de pico fase-neutro, ou seja, 460 Vrms, fase-fase, oscilando pouco entre 453 Vrms e 460 Vrms.

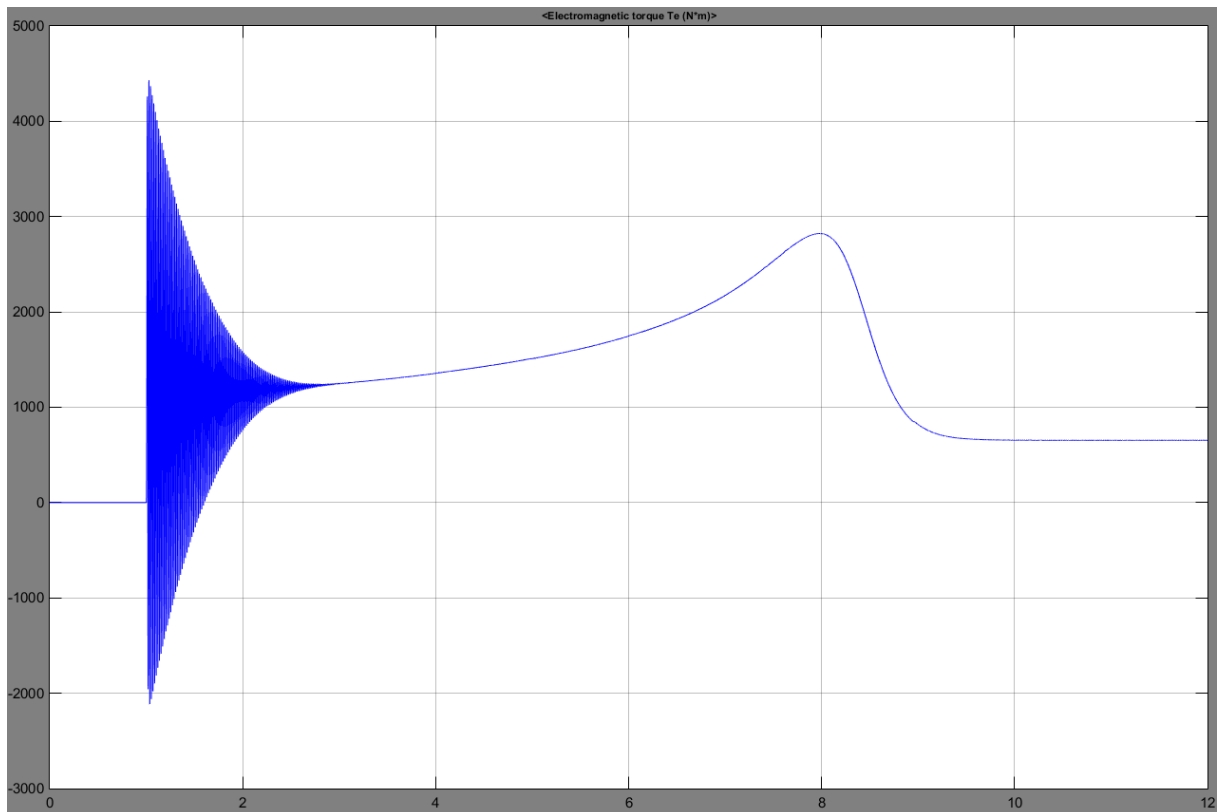
A aceleração do motor de indução pode ser vista na Figura 44, e o torque produzido na Figura 45.

Figura 44 – Resposta final da aceleração do motor de indução



Fonte: o autor

Figura 45 – Resposta final do torque do motor de indução



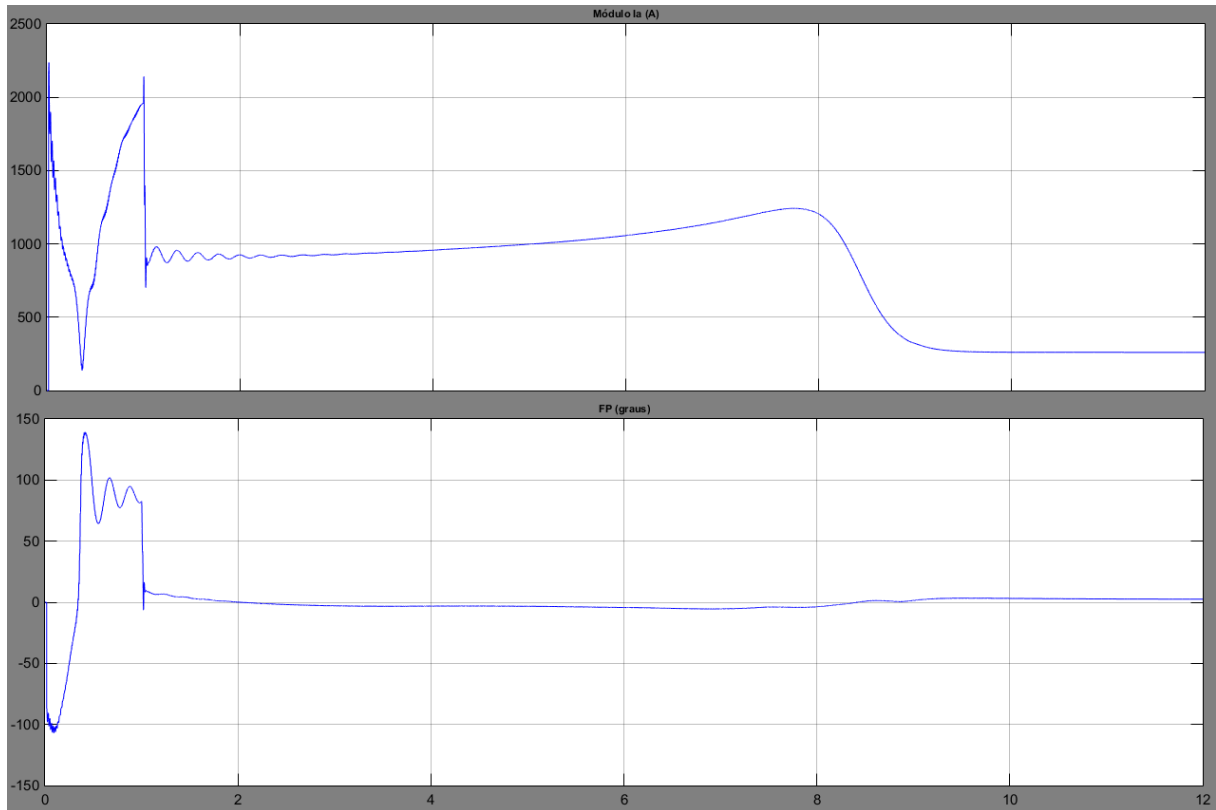
Fonte: o autor

Apesar do crescimento de 1 segundo ao processo de excitação devido às necessidades do compensador síncrono, a velocidade nominal do motor de indução foi alcançada após 9,5 segundos de funcionamento.

Houve melhoras nas características de torque máximo e no torque de partida tendo o torque máximo atingido um valor de 2810 N.m em 8 segundos de funcionamento do sistema. Apesar da afirmação de que houve aumento no torque de partida do motor, não foi possível provar esse fato através da Figura 45, pois há um efeito transitório com um sobressinal muito grande na curva de torque. A estimativa foi feita, considerando que o torque do motor de indução é proporcional ao quadrado da tensão e, como o afundamento de tensão na partida praticamente desapareceu, estimasse que o conjugado tenha aumentado devido a isso.

O comportamento do valor eficaz de corrente, e do ângulo do fator de potência, pode ser visto na Figura 46.

Figura 46 – Resposta final da corrente e ângulo de fator de potência durante a aceleração do motor



Fonte: o autor

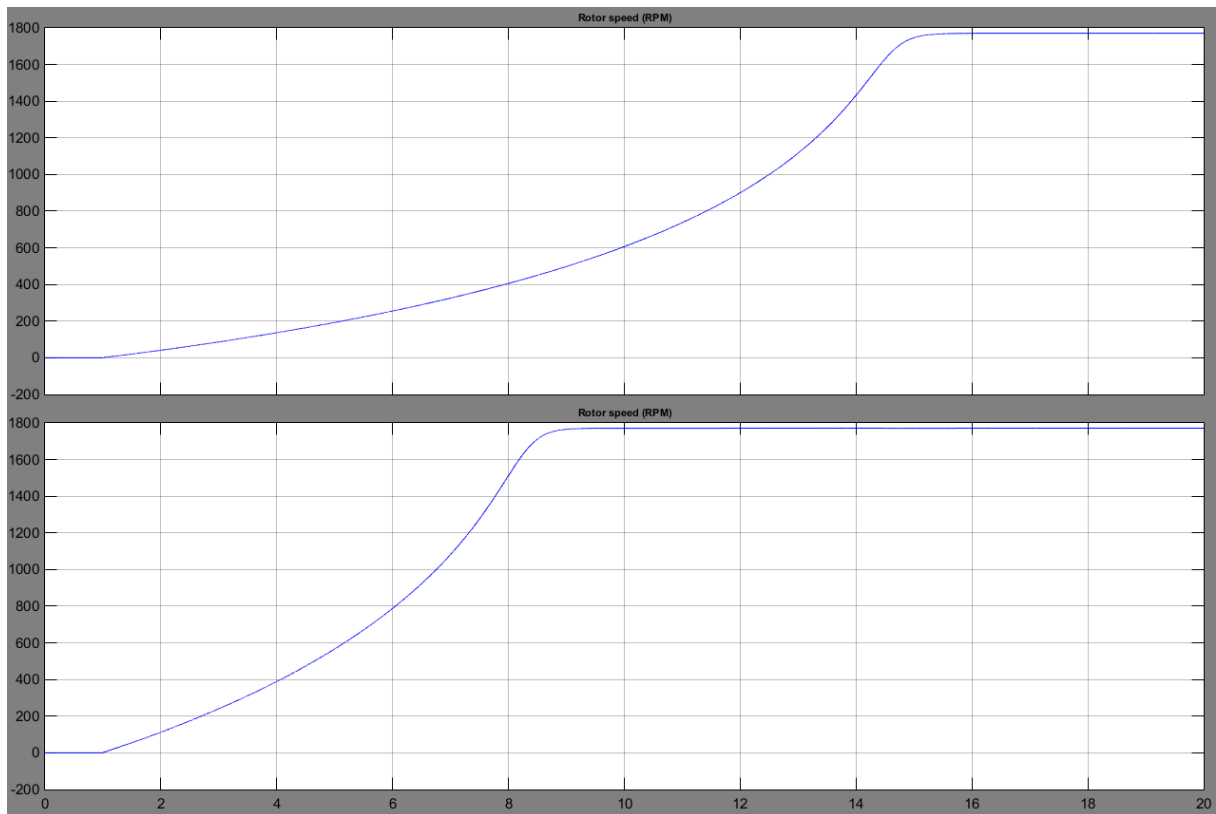
Após a partida do motor de indução a energia reativa foi quase que instantaneamente compensada fazendo com que a corrente no momento da partida fosse aproximadamente 920 A. Até aproximadamente 8 segundos a corrente aumentou suavemente até 1200 A e após isso decresceu até atingir seu valor nominal de 262 A.

A partir do momento da partida do motor de indução, em exatamente 1 segundo de simulação, o motor de indução foi acionado, mas através do controle dinâmico da potência reativa do compensador síncrono o mesmo foi capaz de suprir toda necessidade do motor de indução fazendo com que o fator de potência permanecesse em aproximadamente durante todo seu funcionamento.

6.5. COMPARAÇÕES ENTRE O MÉTODO DO COMPENSADOR SÍNCRONO E O MÉTODO DA PARTIDA DIRETA

Nesta sessão serão apresentadas comparações entre o motor de indução partindo ligado diretamente na rede e outro partindo através de um compensador síncrono. As curvas de cima representam a partida direta, e as de baixo a partida com o compensador síncrono. A Figura 47 mostra o comparativo da aceleração do motor, e a Figura 48 o torque desenvolvido.

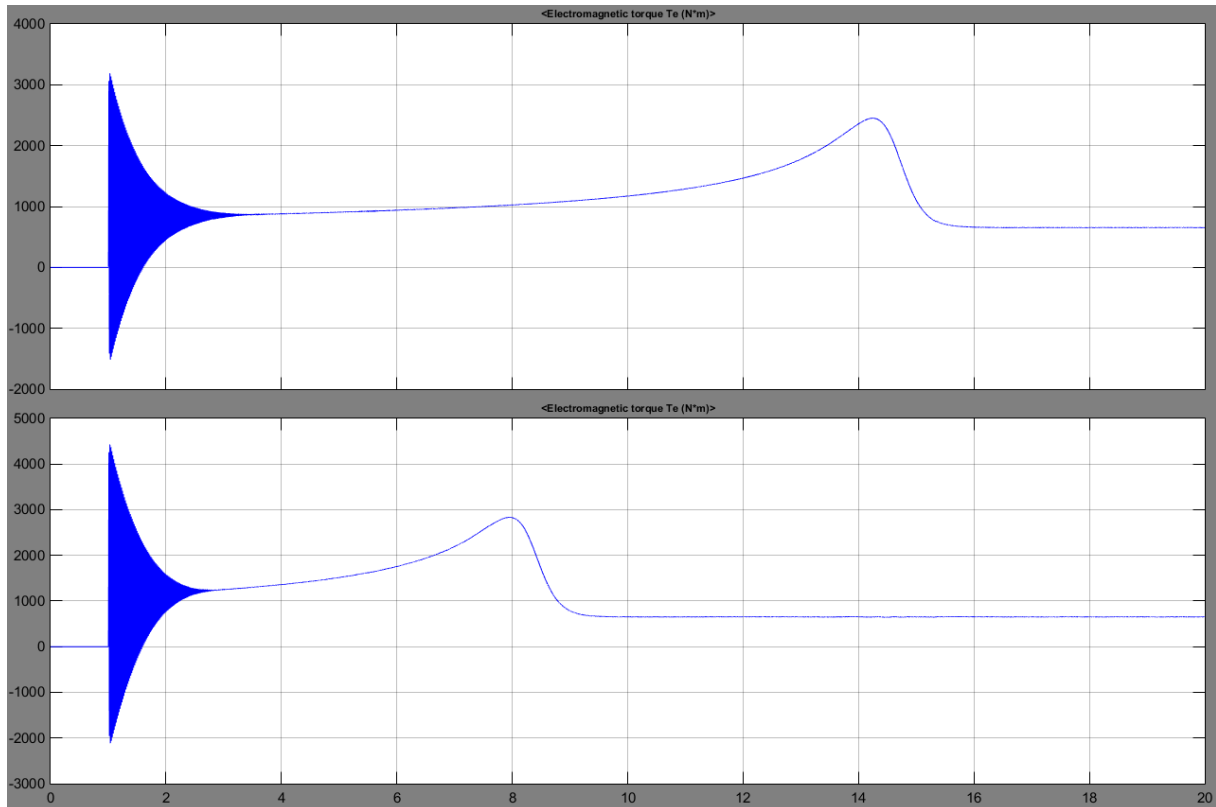
Figura 47 – Comparação das curvas de aceleração



Fonte: o autor

Pode-se observar através da Figura 47 que houve uma drástica melhora na aceleração do motor de indução após a inserção do compensador síncrono em relação à partida direta. Apesar do acréscimo de 1 segundo a mais se considerar todo o processo entre partir o compensador síncrono e o motor de indução atingir sua velocidade de funcionamento, o motor de indução atingiu sua velocidade de funcionamento 4 segundos mais cedo. Um total de 30% a menos de tempo.

Figura 48 – Comparação das curvas de torque

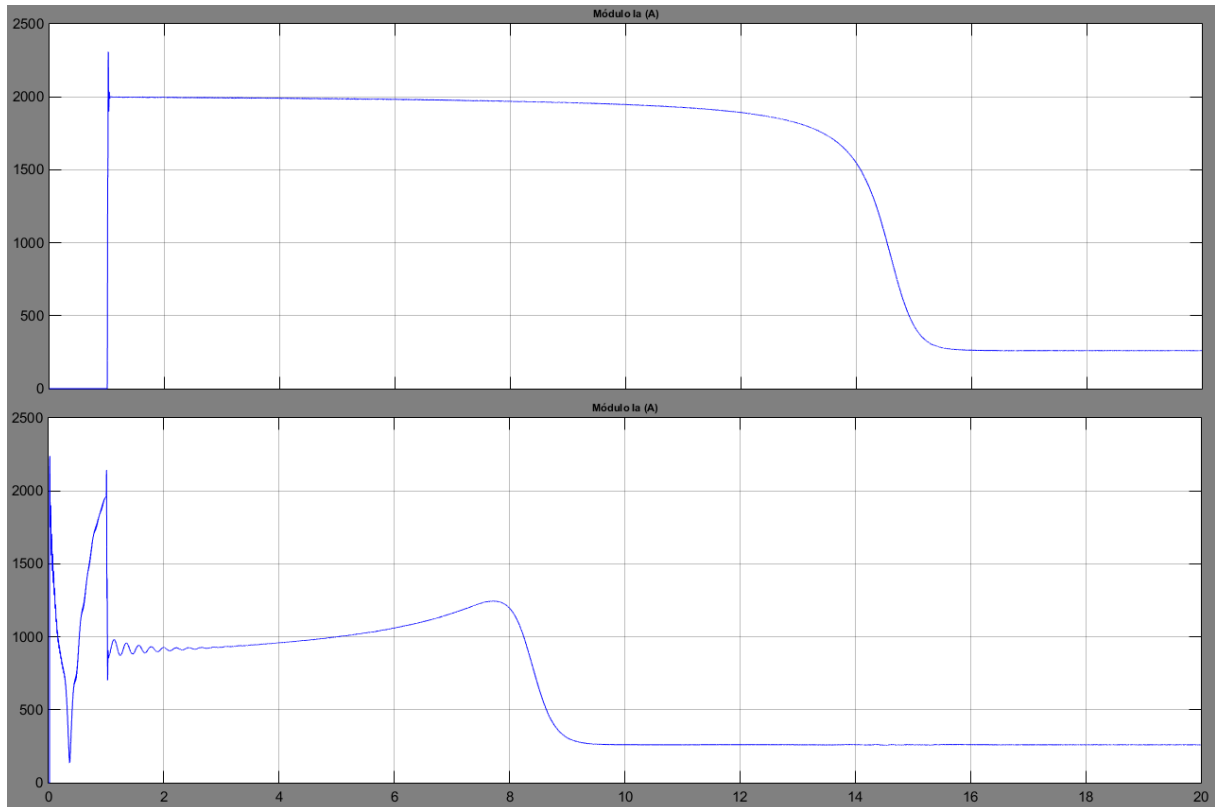


Fonte: o autor

Em relação ao torque máximo desenvolvido pelo motor também houve uma expressiva melhora, sendo que o motor passou a desenvolver um torque máximo de 2810 N.m ao invés de 2590 N.m. Também houve melhoras no torque de partida do motor. Apesar de não ser possível pela Figura saber o valor exato, pelo valor visualizado ao final do transitório é possível deduzir que o torque de partida é um valor próximo àquele.

É possível comparar, na Figura 49, as curvas de corrente no sistema sem e com compensação de reativos. Já a Figura 50 mostra as potências ativa e reativa em ambos os casos.

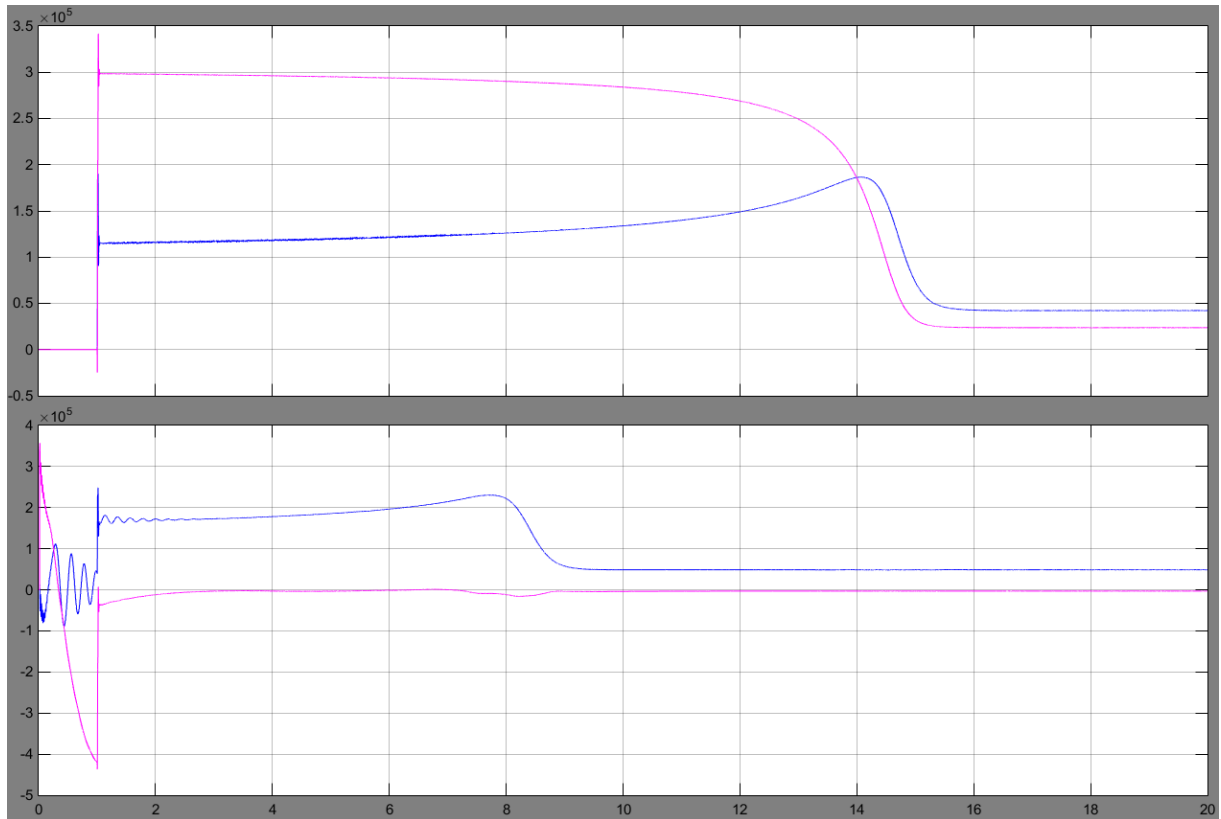
Figura 49 – Comparação das curvas de corrente



Fonte: o autor

Na Figura 49 observa-se que, apesar de que os picos máximos de corrente tenham sido iguais a 2000 A tanto para a partida direta quanto através do compensador síncrono, o tempo em que o sistema compensado permaneceu absorvendo 2000 A foi extremamente curto. Porém ao se considerar a partida do motor de indução o pico de corrente na partida direta foi de 2000 A, já para o sistema compensado foi uma curva crescente que variou de 920 A até 1200 A. Em regime permanente ambas as correntes tenderam para aproximadamente 262 A, porém o sistema compensado atingiu a velocidade de operação mais rápido.

Figura 50 – Comparação das curvas de potência



Fonte: o autor

A análise da Figura 50 mostra que potência ativa, como esperado, sofreu pouca variação entre os dois métodos, sendo que a diferença foi provocada pelas perdas do compensador síncrono. O sistema compensado absorveu $3 \times 6,5$ kW mais potência ativa que o motor através da partida direta da rede.

Quanto à potência reativa, na partida direta a potência reativa máxima absorvida da rede foi 3×310 kvar logo no momento da partida do motor, e esse valor decresceu até atingir o valor de 3×24 kvar. O fator de potência do sistema partindo diretamente da rede em regime permanente foi de 0,87. Quanto ao sistema compensado não houve necessidade de a rede fornecer reativos para o motor de indução, sendo assim o fator de potência no barramento conectado às máquinas foi de aproximadamente zero.

A Figura 51 compara a tensão no barramento. Em relação à tensão observa-se que o afundamento causado no sistema compensado foi insignificante, oscilando entre 453 Vrms e 460 Vrms, menos do que 2% em relação a tensão nominal. Quanto

ao sistema conectado diretamente na rede a tensão chegou a atingir o nível de 390 Vrms, aproximadamente 15% abaixo da tensão nominal.

Figura 51 – Comparação entre as envoltórias de tensão



Fonte: o autor

Um resumo numérico comparativo das grandezas pode ser visto na tabela 3.

Tabela 3 – Comparação dos dados obtidos através das simulações

Variáveis de interesse	Partida direta	Com compensador síncrono
	Valor	Valor
Tempo de aceleração	13,5 s	8,5 s
Conjugado máximo	2590 N.m	2810 N.m
Corrente de partida	2030 A	920-1200 A
Fator de potência na partida	0,28	1
Fator de potência em regime	0,86	1
Corrente em regime permanente	259 A	262 A
Tensão na partida	390 Vrms	453-460 Vrms
Afundamento de tensão na partida	15%	1%
Potência ativa em regime permanente	42500 W	49000 W
Potência reativa na partida	3x310 kvar (ind)	0
Potência reativa em regime permanente	3x24 kvar (ind)	0

Fonte: o autor

7. CONCLUSÃO

Apesar de que partir um motor de indução conectado diretamente na rede seja uma alternativa relativamente barata em relação a outros métodos de partida, ela possui várias desvantagens e limitações. A alta corrente na partida, predominantemente indutiva, reduz a tensão no barramento de conexão, trazendo outros problemas associados, tal como aumento no tempo de aceleração da máquina. Sendo recomendado apenas para motores de baixa potência e que somadas suas potências sejam insignificantes comparados ao restante da instalação.

Este trabalho avaliou um motor de indução gaiola de alta potência com partida direta. Sem elementos auxiliares, houve uma queda de tensão maior do que 10% da tensão nominal e isso excede o limite imposto pela norma brasileira. Como analisado, utilizar um compensador síncrono para auxiliar a partida direta na rede é vantajoso em todos os aspectos.

Verificou-se, por simulação, que o compensador síncrono pode ser programado para reduzir o consumo de reativos durante todo o uso do motor de indução, o que melhora significativamente a tensão do barramento mesmo na partida. Isso ocorre devido à compensação local da parcela reativa da corrente, que como foi visto nas simulações é majoritária durante a aceleração. Como consequência da melhora da tensão, tem-se a melhora do torque de partida bem como do torque máximo. Como o torque é proporcional ao quadrado da tensão, obtém-se um torque em valores próximos aos nominais. Com maior torque produzido, se obtém um tempo de aceleração menor. Ou seja, a máquina entra em regime mais rapidamente.

Como constatado através dos resultados, o compensador síncrono se torna uma opção viável quando a redução do torque na partida do motor de indução pode causar prejuízos ao processo ou ao funcionamento do mesmo. O grande problema em o motor de indução ter seu torque reduzido é que isso impacta na aceleração do motor, uma vez que quanto maior o torque desenvolvido, mais rápido esse motor irá atingir sua velocidade nominal.

Uma vantagem interessante que o compensador síncrono traz em relação à chave estrela-triângulo, chave compensadora e soft-starter é o fato de conseguir controlar os níveis de reativos na rede durante todo o funcionamento do motor de indução trifásico.

Pode-se aqui também contar com a possibilidade de usar bancos de capacitores para a compensação de reativos no lugar dos compensadores síncronos, pois os bancos de capacitores desempenham um papel semelhante ao dos compensadores síncronos, porém há vantagens e desvantagens para cada um. Como vantagem dos compensadores síncronos em relação ao banco de capacitores pode-se destacar os próprios resultados. Os compensadores síncronos conseguem realizar continuamente a correção de fator de potência, não causando distúrbios transitórios na rede devido aos vários chaveamentos necessários que um banco de capacitores precisa para chegar próximo de realizar a mesma correção. Do ponto de vista da qualidade da energia os compensadores síncronos são muito superiores aos bancos de capacitores. Como desvantagem, pode-se citar que os compensadores síncronos possuem maiores perdas do que os bancos de capacitores.

Como continuidade do trabalho, são feitas as seguintes sugestões: analisar por simulação e também financeiramente as diferenças entre os compensadores síncronos e os bancos de capacitores. Também pode-se sugerir analisar o uso de um compensador estático (STATCOM) com os mesmos objetivos; avaliar o desempenho dos compensadores síncronos em relação aos soft-starters e inversores de frequência; avaliar os impactos no período transitório que os compensadores síncronos causam à rede no momento que precede o acionamento dos motores de indução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FITZGERALD, E. A; KINGSLEY JR, C; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas: Com introdução à eletrônica de potência.** 6. Ed. Porto Alegre: Bookman Companhia. 2006. Cap. 5-6.

IRVING L. KOSOW. **Máquinas elétricas e transformadores: Volume 1.** 4ª Ed. Globo. porto alegre. Rio de janeiro. 1982. Cap 6, 8 e 9.

P. C. SEN. **Principles of electric machines and power electronics.** 2ª. Ed. John wiley & sons. New york. 1996. Cap. 5-6.

EDP escelsa – Normas e manuais. **Informações sobre grandes clientes:** manual. Disponível em: < <http://www.edp.com.br/distribuicao/edp-escelsa/informacoes/grandes-clientes/normas-e-manuais/Documents/Manual%20de%20Orienta%E7%E3o%20-%20Crit%E9rios%20de%20Contrata%E7%E3o%20e%20Tarifas%20Aplicadas.pdf> > acesso em dezembro de 2017.

SOUZA, N. S. **Apostila de acionamentos elétricos.** 2009. Disponível em: <<http://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-e-acionamentos-eletricos-ii/apostila-basica>> acesso em outubro de 2017.

MUNDO DA ELETRICA, **Soft-starter.** 2018. Disponível em: < <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-um-soft-starter/> > acesso em janeiro de 2018.

WEG, Motores de indução alimentados por inversor de frequência: artigo técnico. 2016. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>> acesso em novembro de 2017.

SALIN, R. **Compensação dinâmica de reativo na partida de motores de indução.** Projeto de graduação. Curitiba: Universidade federal do paraná. Edição do autor. 2011.

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – IFG, Máquinas síncronas. **Apostila de máquinas elétricas 1:** artigo técnico. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/24659433/apostila-de-maquinas-ca---maquinas-sincronas-para-engenharia-2016-1>> acesso em outubro de 2017.

WEG, Motores síncronos: artigo técnico. 2016. Disponível em:
<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-sincronos-artigo-tecnico-portugues-br.PDF>> acesso em novembro de 2017.

APÊNDICE A – Linhas de código do Matlab para plotar a Figura 3

```
%%Código Matlab para plotar o gráfico da Figura (3)
```

```
clc
```

```
clear
```

```
fe = 60;
```

```
fases = 3;
```

```
polos = 4;
```

```
R1 = 0.01;
```

```
R2 = 0.1;
```

```
X1 = 0.7;
```

```
X2 = 0.7;
```

```
Xm = 25;
```

```
V = 220/sqrt(3);
```

```
%calculo da velocidade sincrona
```

```
ws = 4*pi*fe/polos;
```

```
ns = 120*fe/polos;
```

```
%equivalente de thevenin do estator
```

```
Z1eq = j*Xm*(R1 + j*X1)/(R1 + j*(X1+Xm));
```

```
R1eq = real(Z1eq);
```

```
X1eq = imag(Z1eq);
```

```
V1eq = abs(V*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));
```

```
%laço do escorregamento
```

```
for n = 1:1000
```

```
    s(n) = n/1000;
```

```
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
```

```
    I2 = abs(V1eq/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
```

```
    Tmech(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
```

```
end
```

```
plot(rpm, Tmech)
```

APÊNDICE B – Linhas de código do Matlab para plotar a Figura 8

```

%%Código Matlab para plotar o gráfico da Figura (4)
clc
clear

V1 = [220/sqrt(3) 0.75*220/sqrt(3) 0.5*220/sqrt(3)];

for var = 1:3

fe = 60;
fases = 3;
polos = 4;
R1 = 0.01;
R2 = 0.1;
X1 = 0.7;
X2 = 0.7;
Xm = 25;
V = V1(var);

for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = 1800*(1-s(n));
    Zeq(n) = R1+j*X1+((j*Xm)*((R2./s(n))+j*X2)/((R2./s(n))+j*(X2+Xm)));
end

I = V./Zeq;

subplot(3,1,1);
plot(rpm, abs(I));
xlabel('Velocidade [RPM]');
ylabel('Corrente [A]');
legend('Plena tensão na alimentação', 'Tensão reduzida para 75%', 'Tensão reduzida para 50%');

hold on

subplot(3,1,3);
plot(rpm, cos(angle(I)));
xlabel('Velocidade [RPM]');

```

```

ylabel('Fator de potência');
legend('Fator de potência');

hold on

%calculo da velocidade sincrona
ws = 4*pi*fe/polos;
ns = 120*fe/polos;

%equivalente de thevenin do estator
Z1eq = j*Xm*(R1 + j*X1)/(R1 + j*(X1+Xm));
R1eq = real(Z1eq);
X1eq = imag(Z1eq);
V1eq = abs(V*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));

%laço do escorregamento
for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
    I2 = abs(V1eq/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
    Tmech(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
end

subplot(3,1,2);
plot(rpm, Tmech);
xlabel('Velocidade [RPM]');
ylabel('Conjugado [N.m]');
legend('Plena tensão na alimentação', 'Tensão reduzida para 75%', 'Tensão reduzida para 50%');

hold on

end

```

```

%%%Código Matlab para plotar o gráfico da Figura (8)
clc
clear

fe = 60;
fases = 3;
polos = 4;
R1 = 0.01;
R2 = 0.1;
X1 = 0.7;
X2 = 0.7;
Xm = 25;
V = 220/sqrt(3);

%%%laço de corrente
for n = 1:1000

    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = 1800*(1-s(n));
    Zeq(n) = R1+j*X1+(j*Xm)*((R2./s(n))+j*X2)/((R2./s(n))+j*(X2+Xm));

end

I1 = (V*0.65)./Zeq;

subplot(2,1,1);
plot(rpm, abs(I1));

hold on

%%%

I2 = (V*0.7375)./Zeq;

subplot(2,1,1);
plot(rpm, abs(I2));

hold on

```



```

%%%%%%%%%%

I3 = (V*0.825)./Zeq;

subplot(2,1,1);
plot(rpm, abs(I3));

hold on

%%%%%%%%%%

I4 = (V*0.9125)./Zeq;

subplot(2,1,1);
plot(rpm, abs(I4));

hold on

%%%%%%%%%%

I5 = (V)./Zeq;

subplot(2,1,1);
plot(rpm, abs(I5));
xlabel('Velocidade [rpm]');
ylabel('Corrente');
legend('tap1', 'tap2', 'tap3', 'tap4', 'tap5');

hold on

%%%%%%%%%%calculo da velocidade sincrona

ws = 4*pi*fe/polos;
ns = 120*fe/polos;

%equivalente de thevenin do estator
Z1eq = j*Xm*(R1 + j*X1)/(R1 + j*(X1+Xm));
R1eq = real(Z1eq);
X1eq = imag(Z1eq);

```

```

V1eq1 = abs((V*0.65)*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));

%laço do escorregamento
for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
    I2 = abs(V1eq1/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
    Tmech1(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
end

subplot(2,1,2);
plot(rpm, Tmech1)
hold on

%%%%%%%%%%%%%

V1eq2 = abs((V*0.7375)*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));

%laço do escorregamento
for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
    I2 = abs(V1eq2/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
    Tmech2(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
end

subplot(2,1,2);
plot(rpm, Tmech2)
hold on

%%%%%%%%%%%%%

V1eq3 = abs((V*0.825)*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));

%laço do escorregamento
for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
    I2 = abs(V1eq3/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
    Tmech3(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
end

```

```

subplot(2,1,2);
plot(rpm, Tmech3)
hold on

%%%%%%%%%%%%%
V1eq4 = abs((V*0.9125)*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));

%laço do escorregamento
for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
    I2 = abs(V1eq4/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
    Tmech4(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
end

subplot(2,1,2);
plot(rpm, Tmech4)
hold on

%%%%%%%%%%%%%
V1eq5 = abs((V)*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));

%laço do escorregamento
for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
    I2 = abs(V1eq5/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
    Tmech5(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
end

subplot(2,1,2);
plot(rpm, Tmech5)
xlabel('Velocidade [rpm]');
ylabel('Conjugado');
legend('tap1', 'tap2', 'tap3', 'tap4', 'tap5');

```

```

%%Código Matlab para plotar o gráfico da Figura (10)
clc
clear
fe = 60;
fases = 3;
polos = 4;
R1 = 0.01;
R2 = 0.1;
X1 = 0.7;
X2 = 0.7;
Xm = 25;
V = 220/sqrt(3);

%%%%%%%%%laço de corrente
for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = 1800*(1-s(n));
    Zeq(n) = R1+j*X1+(j*Xm)*((R2./s(n))+j*X2)/((R2./s(n))+j*(X2+Xm));
end

I1 = (V*0.65)./Zeq;

subplot(2,1,1);
plot(rpm, abs(I1));

hold on

%%%%%%%%%

I2 = (V*0.7375)./Zeq;

subplot(2,1,1);
plot(rpm, abs(I2));

hold on

%%%%%%%%%

I3 = (V*0.825)./Zeq;

```

```

subplot(2,1,1);
plot(rpm, abs(I3));

hold on

%%%%%%%%%%%%

I4 = (V*0.9125)./Zeq;

subplot(2,1,1);
plot(rpm, abs(I4));

hold on

%%%%%%%%%%%%

I5 = (V)./Zeq;

subplot(2,1,1);
plot(rpm, abs(I5));
xlabel('Velocidade [rpm]');
ylabel('Corrente');
legend('tap1','tap2','tap3','tap4','tap5');

hold on

%%%%%%%%%%%%calculo da velocidade sincrona

ws = 4*pi*fe/polos;
ns = 120*fe/polos;

%equivalente de thevenin do estator
Z1eq = j*Xm*(R1 + j*X1)/(R1 + j*(X1+Xm));
R1eq = real(Z1eq);
X1eq = imag(Z1eq);
V1eq1 = abs((V*0.65)*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));

%laço do escorregamento
for n = 1:1000

```

```

s(n) = n/1000;
rpm(n) = ns*(1-s(n));
I2 = abs(V1eq1/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
Tmech1(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
end

subplot(2,1,2);
plot(rpm, Tmech1)
hold on

%%%%%%%%%%%%

V1eq2 = abs((V*0.7375)*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));

%laço do escorregamento
for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
    I2 = abs(V1eq2/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
    Tmech2(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
end

subplot(2,1,2);
plot(rpm, Tmech2)
hold on

%%%%%%%%%%%%

V1eq3 = abs((V*0.825)*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));

%laço do escorregamento
for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
    I2 = abs(V1eq3/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
    Tmech3(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
end

subplot(2,1,2);
plot(rpm, Tmech3)
hold on

```

```

%%%%%%%%%%
V1eq4 = abs((V*0.9125)*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));

%laço do escorregamento
for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
    I2 = abs(V1eq4/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
    Tmech4(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
end

subplot(2,1,2);
plot(rpm, Tmech4)
hold on

%%%%%%%%%%
V1eq5 = abs((V)*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));

%laço do escorregamento
for n = 1:1000
    s(n) = n/1000;
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
    I2 = abs(V1eq5/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
    Tmech5(n) = fases*(I2^2)*R2/(s(n)*ws);
end

subplot(2,1,2);
plot(rpm, Tmech5)
xlabel('Velocidade [rpm]');
ylabel('Conjugado');
legend('tap1', 'tap2', 'tap3', 'tap4', 'tap5');

%%%%%%%%%%

```

APÊNDICE E – Controle de tensão do circuito de campo (Eq. 38)

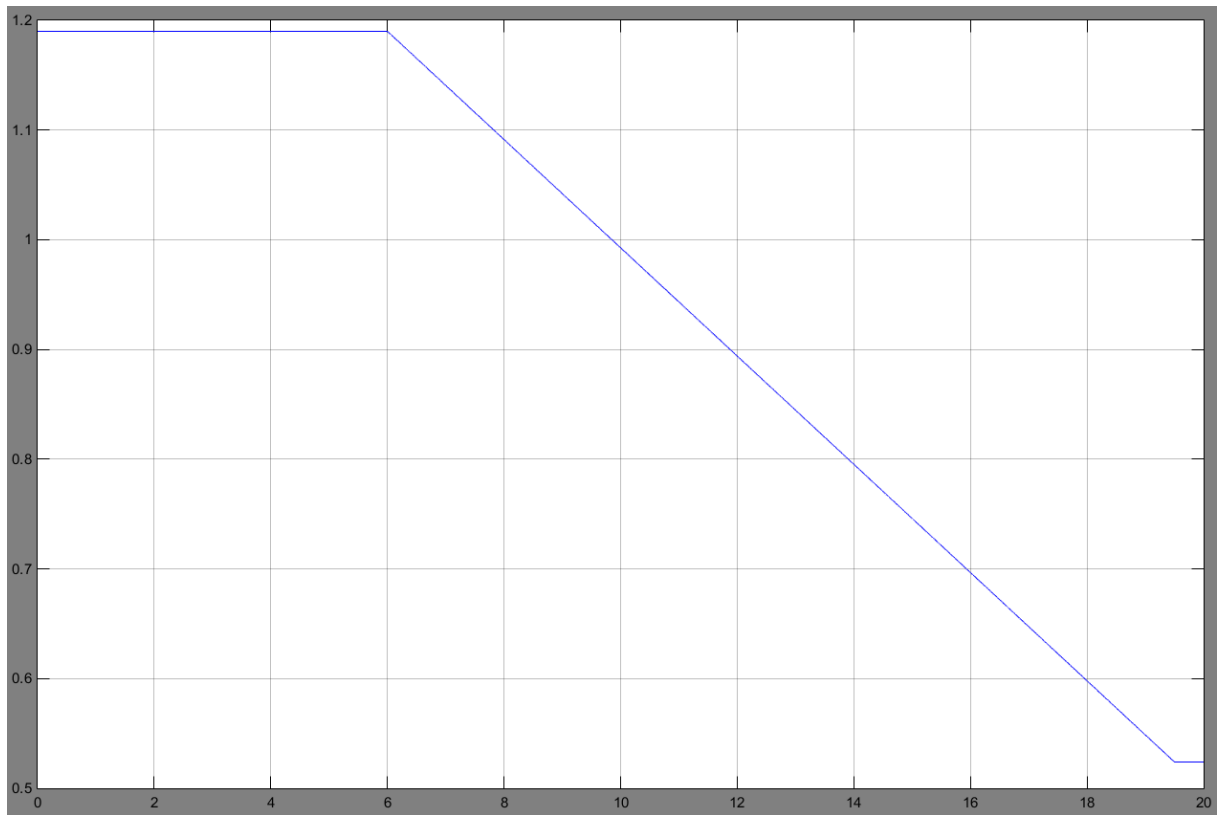


Figura 52) Controle da tensão V_f (pu) no enrolamento de campo do compensador síncrono (Equação 38) durante a aceleração do motor de indução

APÊNDICE F - Controle de tensão do circuito de campo (Eq. 41.a e 41.b)

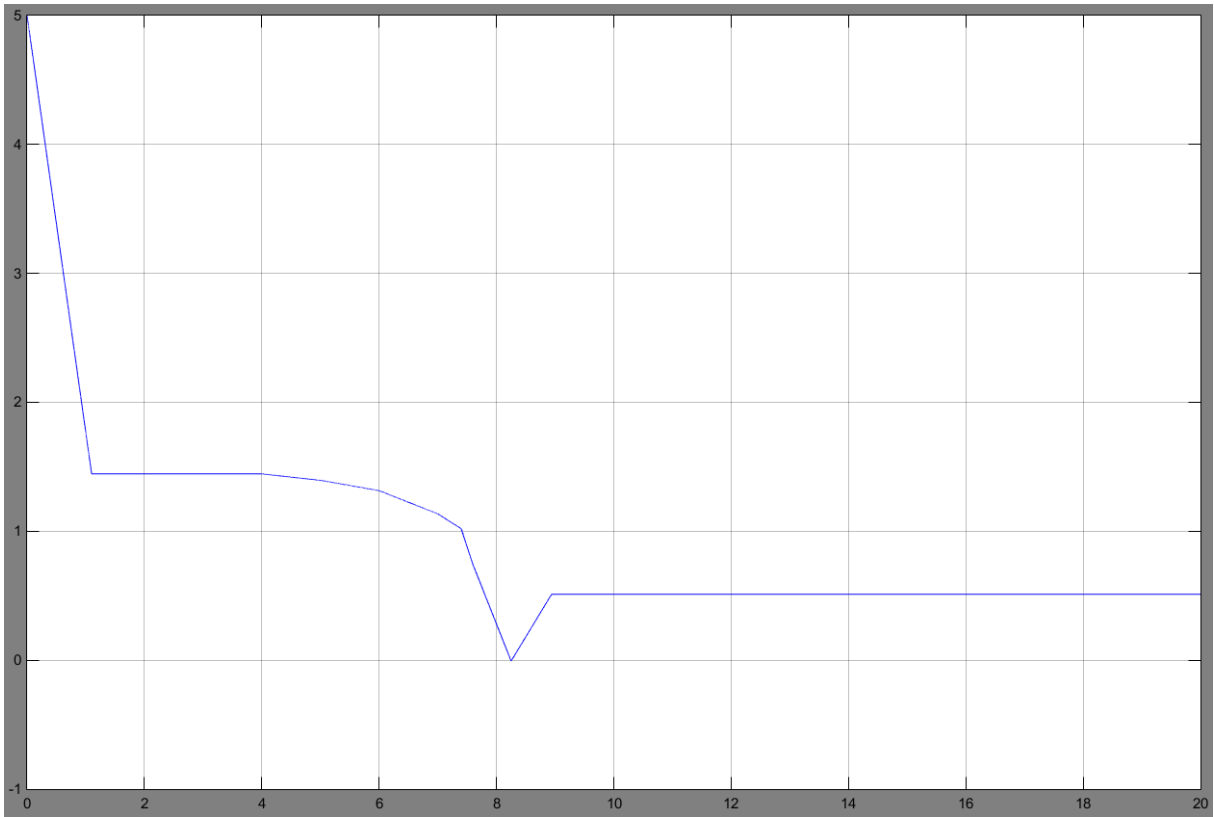


Figura 53) Versão final do controle da tensão V_f (pu) no enrolamento de campo do compensador síncrono (Equações 41.a e 41.b) durante a aceleração do motor de indução