

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE SOARES CAMPOLINA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UM MOTOR DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICO DURANTE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO  
DE CURTA DURAÇÃO**

VIÇOSA  
2017

FELIPE SOARES CAMPOLINA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UM MOTOR DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICO DURANTE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO  
DE CURTA DURAÇÃO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates.

VIÇOSA  
2017



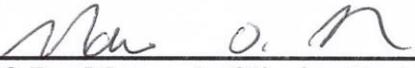
**FELIPE SOARES CAMPOLINA**

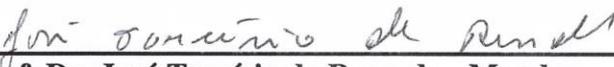
**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UM MOTOR DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICO DURANTE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO  
DE CURTA DURAÇÃO**

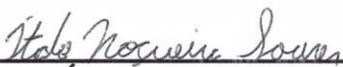
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 14 de julho de 2017.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Orientador**  
**Universidade Federal de Viçosa**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

  
\_\_\_\_\_  
**M. Sc. Ítalo Nogueira Soares - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

*“A sorrir eu pretendo levar a vida....”*

*(Cartola)*

*Dedico este trabalho a minha família e amigos.*

## *Agradecimentos*

Agradeço, primeiramente, a minha família pelo suporte durante toda a graduação, fundamental para a conclusão deste trabalho.

Agradeço também ao Professor Mauro Prates e a banca examinadora pela motivação e disponibilidade.

Um abraço a todos os amigos.

## *Resumo*

Este trabalho tem por objetivo viabilizar análises com respeito a um distúrbio relacionado a Qualidade de Energia Elétrica (QEE) denominado Afundamento de Tensão de Curta Duração em motores de indução trifásicos. A máquina em questão é amplamente utilizada para acionamentos mecânicos em aplicações industriais e apresenta comportamentos anormais quando submetida a fontes de alimentação com afundamento de tensão. O ambiente de simulação utilizado foi o Simulink que é uma toolbox do software Matlab®. Uma revisão teórica sobre motores de indução e afundamento de tensão é descrita neste trabalho onde é possível obter relações para as análises contidas nos resultados. Tais resultados apresentam as características e análises da tensão fase-neutro RMS para as fases A, B e C, além dos parâmetros com relação ao desempenho do motor como velocidade de rotação do eixo da máquina, correntes estatóricas e potência consumida, submetidos aos sags dos tipos A, B, C e D.

## *Abstract*

The aim of this thesis is the viability of the analysis concerning Voltages Sags in a three-phase Induction Motors. The machine present in this work is broadly used for mechanical drive within industrial application and exhibit an unuasual behavior when supply by voltage sag sources. The environment of simulation used is the Simulink, Matlab's toolbox. A theoretical review on Induction Motors and Voltage Sag is important for getting results with best accuracy.

## *Sumário*

1	Introdução.....	15
1.1	O Motor de Indução Trifásico .....	16
1.1.1	Introdução.....	16
1.1.2	Estrutura de Funcionamento.....	17
1.1.3	Movimento Relativo relacionados ao Motor de Indução Trifásico.....	18
1.1.4	Circuito Equivalente do Motor de Indução Trifásico.....	19
1.1.5	Potência e Conjugado relacionado a Motor de Indução Trifásico.....	20
1.1.6	Partida do Motor de Indução .....	22
1.2	Afundamento de Tensão de Curta Duração.....	24
1.2.1	Introdução.....	24
1.2.2	Análise do Afundamento de Tensão.....	25
1.2.3	Classificação e tipos de afundamento de tensão.....	26
1.4	Objetivo Geral .....	30
2	Materiais e Métodos .....	31
2.1	Descrição do Motor de Indução utilizado .....	31
2.2	Metodologia de Simulação para o afundamento de tensão .....	32
2.2.1	Afundamento tipo A.....	33
2.2.2	Afundamento tipo B .....	35
2.2.3	Afundamento tipo C .....	36
2.2.4	Afundamento tipo D .....	38
3	Resultados e Discursões .....	42
3.1	Análise do comportamento do Motor de Indução durante os Afundamentos de Tensão.....	42
3.1.1	Resultados a partir do afundamento de tensão tipo A .....	43
3.1.2	Resultados a partir do afundamento de tensão tipo B .....	47
3.1.3	Resultados a partir do afundamento de tensão tipo C .....	51
3.1.4	Resultados a partir do afundamento de tensão tipo D .....	55
3.2	Consequências das correntes estatóricas .....	59
4	Conclusões.....	61
	Referências Bibliográficas .....	63

## *Lista de Figuras*

Figura 1 - Motor de Indução Trifásico com rotor gaiola de esquilo.....	18
Figura 2 - Circuito Equivalente do Motor de Indução Trifásico .....	19
Figura 3 - Fluxo de potência de um Motor de Indução .....	21
Figura 4 - Corrente na Fase A do estator durante a partida do motor .....	23
Figura 5 - Torque Eletromecânico durante a partida do motor .....	23
Figura 6 - Velocidade de rotação do eixo do motor durante a partida .....	24
Figura 7 - Afundamento de tensão representado pela forma de onda .....	25
Figura 8 - Caracterização em relação a magnitude do evento afundamento de tensão [6] .....	26
Figura 9 - Caracterização do afundamento de tensão em relação ao tempo [6].....	26
Figura 10 - Diagrama Fasorial dos tipos de afundamentos de tensão .....	29
Figura 11 - Interface da simulação realizada.....	31
Figura 12 - Forma de onda da tensão fase-neutro na fase A durante um afundamento de tensão tipo A .....	34
Figura 13 - Tensão fase-neutro RMS (pu) da fase A durante um afundamento de tensão tipo A .....	35
Figura 14 - Tensão fase-neutro das fases A, B e C durante um afundamento de tensão tipo B .....	36
Figura 15 - Tensão fase-neutro das fases A, B e C durante um afundamento de tensão tipo C .....	37
Figura 16 - Tensão fase-neutro RMS (pu) da fase B durante um afundamento de tensão tipo C .....	38
Figura 17 - Tensão fase-neutro das três fases durante um afundamento de tensão tipo D.....	40
Figura 18 - Tensão fase-neutro RMS (pu) da fase A durante um afundamento de tensão tipo D .....	40
Figura 19 - Tensão fase-neutro RMS (pu) da fase B durante um afundamento de tensão tipo D .....	41
Figura 20 - Correntes do estator por fase (A) durante a partida do motor até a estabilização .	43
Figura 21 - Torque Eletromecânico (N*m) do motor de indução durante afundamentos de tensão tipo A .....	44
Figura 22 - Velocidade de Rotação (RPM) do eixo do motor de indução durante afundamentos de tensão tipo A .....	44
Figura 23 - Escorregamento (%) do motor de indução durante o afundamento de tensão tipo A .....	45
Figura 24 - Corrente RMS na Fase A do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo A .....	45

Figura 25 - Potência Ativa do motor de indução (KW) durante o afundamento de tensão tipo A.....	46
Figura 26 - Potência Reativa do motor de indução (KVar) durante um afundamento de tensão tipo A.....	46
Figura 27 - Torque Eletromecânico (N*m) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo B.....	47
Figura 28 - Velocidade de Rotação (RPM) do eixo do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo B.....	48
Figura 29 - Escorregamento (%) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo B.....	48
Figura 30 - Corrente RMS na Fase A do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo B.....	49
Figura 31 - Corrente RMS na Fase B do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo B.....	49
Figura 32 - Corrente RMS na Fase C do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo B.....	50
Figura 33 - Potência Ativa do motor de indução (KW) durante o afundamento de tensão tipo B.....	50
Figura 34 - Potência Reativa do motor de indução (KVar) durante o afundamento de tensão tipo B.....	51
Figura 35 - Torque Eletromecânico (N*m) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo C.....	52
Figura 36 - Velocidade de Rotação (RPM) do eixo do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo C.....	52
Figura 37 - Escorregamento (%) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo C.....	53
Figura 38 - Corrente RMS na fase A do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo C.....	53
Figura 39 - Corrente RMS na fase B do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo C.....	54
Figura 40 - Corrente RMS na fase C do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo C.....	54
Figura 41 - Potência Ativa do motor de indução (KW) durante o afundamento de tensão tipo C.....	55
Figura 42 - Potência Reativa do motor de indução (KVar) durante o afundamento de tensão tipo C.....	55
Figura 43 - Torque Eletromecânico (N*m) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo D.....	56
Figura 44 - Velocidade de Rotação (RPM) do eixo do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo D.....	56
Figura 45 - Escorregamento (%) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo D.....	57

Figura 46 - Corrente RMS na fase A do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo D .....	57
Figura 47 - Corrente RMS na fase B do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo D .....	58
Figura 48 - Corrente RMS na fase C do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo D .....	58
Figura 49 - Potência Ativa do motor de indução (KW) durante o afundamento de tensão tipo D.....	59
Figura 50 - Potência Reativa do motor de indução (KVar) durante o afundamento de tensão tipo D .....	59

## *Lista de Tabelas*

Tabela 1 - Descrição das grandezas presentes na figura 2 .....	20
Tabela 2 - Classificação em relação ao tempo de ocorrência [2] .....	27
Tabela 3 - Tipo da falta e conexão da carga relacionados aos tipos de afundamentos [6].....	29
Tabela 4 - Parâmetros nominais do motor de indução utilizado .....	32
Tabela 5 - Parâmetros em relação ao circuito equivalente do motor de indução .....	32
Tabela 6 - Parâmetros com relação ao afundamento de tensão tipo A aplicado .....	34
Tabela 7 - Parâmetros com relação ao afundamento de tensão tipo C aplicado .....	37
Tabela 8 - Parâmetros associados ao afundamento de tensão D na fase A .....	39
Tabela 9 - Parâmetros relacionados ao afundamento tipo D para a fase B .....	39

# ***1 Introdução***

Por muitos anos, a relação entre concessionárias e consumidores tratou, basicamente, do transporte da energia elétrica das unidades geradores para os usuários finais, em termos técnicos, fornecimento de tensão e corrente sem interrupções. O surgimento de diversos distúrbios associados a utilização de dispositivos eletrônicos combinados a fenômenos tradicionais como curtos-circuitos e descargas elétricas foram as motivações para uma nova visão em relação ao sistema elétrico de potência. Tal mudança consiste no termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e associa a continuidade da tensão, corrente e frequência aos usuários finais dentro de determinados limites relacionando a geração com a carga [1].

De acordo com [2], o autor define QEE como qualquer problema relacionado a variação de tensão, corrente e frequência que resulta em falha ou má operação dos equipamentos dos consumidores. Portanto, o termo QEE trata da compreensão do distúrbio eletromagnético como um todo, ou seja, as possíveis causas e consequências associadas ao consumidor.

Máquinas elétricas e dispositivos eletrônicos em geral, como computadores, inversores de frequência e semicondutores são equipamentos de uso durante a operação cotidiana nas indústrias e causadores de distúrbios relacionados a QEE, além de possuírem uma alta sensibilidade a tais problemas. Distorções na forma da tensão e variação de tensão de curta duração são fenômenos que se destacam durante a operação de tais dispositivos devido principalmente ao chaveamento dos semicondutores e partida de grande motores [3]. Fatores naturais são também uma grande fonte de distúrbios tratados em QEE e são compreendidos por descargas atmosférica, contatos com seres vivos e não vivos e falhas na operação das máquina devido ao tempo de uso [4].

Uma condição anormal de operação do sistema elétrico são situações de curto-circuito (falta). As causas para tal estado associam a falhas de isolamento devido à temperatura, umidade, corrosão e sobretensões internas ou de origem atmosférica e falhas mecânicas relacionadas a quebra ou corte e contato forçado ou acidental dos condutores. Basicamente, o curto-circuito é o fornecimento de um caminho de baixa impedância na rede elétrica gerando correntes com alta magnitude. As consequências no sistema variam da elevação da temperatura nos condutores e equipamentos reduzindo a vida útil do mesmo a uma destruição completa dos dispositivos e cabos. Barramentos e bobinas de máquinas elétricas também podem sofrer danos mecânicos devido à alta força eletromagnética gerada em uma condição de curto-circuito [5].

Curto-circuitos e QEE são bastante relacionados devido às consequências originadas no sistema elétrico além dos prejuízos sofridos pelos consumidores. Um exemplo disto é a variação de tensão de curta duração (VTCD), uma consequência direta dos curtos-circuitos caracterizada como um distúrbio relacionada a QEE. São compreendidas por afundamento, elevação ou interrupção da tensão, durante um intervalo de tempo de até um minuto, originadas principalmente por faltas simétricas e assimétricas na rede elétrica. Partida de grande conjunto de motores elétricos e deserregização de banco de capacitores também são causas relacionadas a VTCD [2]. Dispositivos eletrônicos são bastante sensíveis a tais variações que resulta em perda de banco de dados, má operação e uma possível falha. Além dos equipamento eletrônicos, máquinas elétricas também possui alterações ocasionadas por VTCD que resulta principalmente na redução da vida útil [6].

Atualmente no ambiente industrial, a maneira mais eficaz de acionamento de cargas mecânicas é a utilização dos motores de indução. O alto índice de conversão de energia elétrica em energia mecânica, robustez e o baixo custo associado a construção e manutenção são os principais fatores para escolha de tal equipamento [7] [8]. Porém, quando um motor de indução é submetido a uma situação de afundamento de tensão, o mesmo apresenta alterações na corrente do estator/rotor, velocidade de rotação e torque eletromecânico. Estas variações acarretam em redução do rendimento e vida útil do motor de indução [1].

O estudo do afundamento de tensão, que é uma consequência direta de situações com faltas relacionada a QEE, combinados a larga utilização dos motores de indução em ambiente industrial foram as motivações para a realização deste trabalho.

A estrutura deste trabalho possui inicialmente os fundamentos teóricos, descrito nas seções 1.1 a 1.2, objetivo geral e específicos, presentes na seção 1.4, metodologia, contida no capítulo 2, resultados e discussão apresentado no capítulo 3 e por fim a conclusão, capítulo 4. Os fundamentos teóricos são uma revisão bibliográfica sobre motor de indução e afundamento de tensão, que são os principais focos para a realização deste trabalho.

## **1.1 O Motor de Indução Trifásico**

### **1.1.1 Introdução**

O motor de indução é uma máquina capaz de acionar cargas mecânicas através da conversão eletromecânica de energia. Devido à um princípio de funcionamento simples,

fabricação robusta e baixo custo associado a manutenção, os motores de indução são os mais utilizados dentro do ambiente industrial. Com a evolução tecnológica relacionada a eletrônica de potência, métodos de controle de velocidade foram desenvolvidos para este motor consolidando sua preferência na operação industrial [7].

A aplicação dos motores de indução se estende a acionamentos simples como ventiladores, a cargas com grandes potências como compressores utilizados na indústria química. O dimensionamento deste motor relacionada com a aplicação desejada pode ser, muitas vezes, bem complexo devido à diversos parâmetros envolvidos. A característica da carga mecânica, a rede elétrica disponível para alimentação do motor e o acoplamento do acionamento mecânico são fatores determinantes na escolha do motor de indução [7] [9].

### 1.1.2 Estrutura de Funcionamento

O motor de indução trifásico é constituído de um estator, parte fixa da máquina, e um rotor, parte móvel conectada ao eixo de uma carga mecânico. O acionamento consiste em uma alimentação trifásica conectada diretamente ao estator que, por meio de indução, o rotor obtém tensão e corrente para a criação de torque no eixo do acionamento mecânico [9].

O estator é fabricado de maneira que, quando uma rede trifásica de tensão é conectado ao seu terminal, um campo magnético girando em velocidade síncrona é excitado em seu interior com o objetivo de produzir rotação no eixo do rotor em uma velocidade fixa [10]. É constituído de uma carcaça circular onde o circuito elétrico é montado por bobinas defasadas em 120 graus no espaço em relação ao eixo do mesmo [7].

O rotor, por sua vez, é parte do motor conectada ao eixo que recebe corrente induzidas a partir do estator para a criação torque mecânico [10]. O enrolamento rotórico é classificado em gaiola de esquilo ou bobinado. Devido à facilidade de construção, robustez associado a um baixo custo com manutenção, o enrolamento gaiola de esquilo é o tipo de rotor mais utilizado no ambiente industrial [10]. A figura 1, por [10], ilustra um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo.



Figura 1 - Motor de Indução Trifásico com rotor gaiola de esquilo

### 1.1.3 Movimento Relativo relacionados ao Motor de Indução Trifásico

Quando uma rede trifásica é conectada diretamente aos terminais do estator, as correntes resultantes produzem um campo magnético girante. Tal campo girante possui uma velocidade de rotação que é definida como velocidade síncrona ( $n_{sinc}$ ) e dada por equação (1). A grandeza  $f_{se}$  representa a frequência da rede elétrica conectada e  $P$  o número de polos do motor [9].

$$n_{sinc} = \frac{120f_{se}}{P} \quad (1)$$

O campo magnético produzido no estator combinado ao campo magnético resultante das correntes induzidas no rotor são responsáveis pela criação do torque induzido da máquina. Este torque é relacionado com a velocidade mecânica do eixo do motor ( $n_m$ ) [7].

Durante uma operação em estado permanente do motor de indução trifásico, existe um movimento relativo entre a velocidade síncrona do campo girante produzido no estator e a velocidade do eixo mecânico conectado ao rotor que refere ao termo escorregamento ( $s$ ). É expressado como uma fração da velocidade síncrona definido pela equação (2) [9] [10].

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \quad (2)$$

Os valores para o parâmetro escorregamento variam de 0 a 1, podendo também ser expressados em porcentagem, onde os limites representam condições anormais de operação, rotor com velocidade síncrona ( $s = 0$ ) e rotor bloqueado ( $s = 1$ ). O rotor bloqueado representa também a condição de partida do motor [7].

### 1.1.4 Circuito Equivalente do Motor de Indução Trifásico

Uma maneira de representação do motor de indução trifásico é ilustrado na figura 2 que representa um circuito equivalente por fase da máquina. A maneira de produzir tensão induzida no rotor a partir de campos magnéticos assemelha com a operação de um transformador onde o circuito presente na figura 2 possui a mesma estrutura de um circuito equivalente do mesmo [10]. Os parâmetros presentes na figura 2 são apresentados na tabela 1.

As perdas no estator são relacionadas aos parâmetros  $R_1$  e  $X_1$  e as perdas no núcleo associa aos fatores  $R_c$  e  $X_m$ . Os valores  $X_2$  e  $R_2/s$  corresponde a impedância do rotor referida ao lado do estator. Tal consideração é feita devido ao princípio de operação do circuito relacionar com um transformador [10].

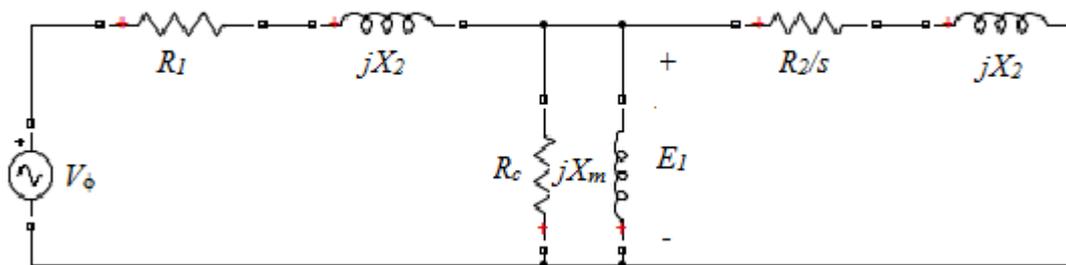


Figura 2 - Circuito Equivalente do Motor de Indução Trifásico

Tabela 1 - Descrição das grandezas presentes na figura 2

$V_{\phi}$	Tensão fase-neutro do estator (V)
$R_1$	Resistência do estator ( $\Omega$ )
$X_1$	Reatância do estator ( $\Omega$ )
$R_c$	Resistência do núcleo ( $\Omega$ )
$X_M$	Reatância de magnetização ( $\Omega$ )
$E_1$	Tensão no rotor refletida no estator (V)
$R_2$	Resistência do rotor refletida no estator ( $\Omega$ )
$X_2$	Reatância do rotor refletida no estator ( $\Omega$ )

### 1.1.5 Potência e Conjugado relacionado a Motor de Indução Trifásico

Com a ampla utilização dos motores de indução trifásico, o estudo das potências relacionadas a partes construtivas da máquina resulta na otimização da eficiência e da vida útil do mesmo [8].

Um diagrama mostrado na figura 3 representa o fluxo de potência de um motor de indução. A potência de entrada ( $P_{entrada}$ ) associa com a tensão e corrente fornecida pela rede elétrica. As perdas no cobre do estator ( $P_{PCE}$ ) é relacionada a resistência  $R_1$  resultando em perdas por efeito joule. Correntes parasitas e histerese são características de perdas relacionadas ao núcleo ferromagnético contido no estator,  $P_{núcleo}$  [9].

A potência transferida do estator ao rotor, chamada de potência de entreferro ( $P_{ef}$ ), é resultante da diferença entre a potência de entrada e perdas relacionadas ao cobre e núcleo do estator onde representa a potência líquida presente no entreferro antes da indução para os terminais do rotor [10].

O rotor também possui uma resistência de enrolamento na qual as perdas são associadas. A subtração da potência de entreferro por tais perdas resulta na conversão da energia elétrica para a energia mecânica, denominada potência de conversão ( $P_{conv}$ ).

As perdas por atrito e ventilação, representado por  $P_{AcV}$ , e perdas suplementares,  $P_{Suplem}$  são perdas devidos à fatores mecânicos da máquina. Quanto maior a velocidade nominal do eixo mecânico do motor de indução, maior são as perdas mecânicas. As perdas no núcleo associadas a perdas mecânicas são colocadas como perdas rotacionais e colocadas na maioria dos casos como constante devido a variação em sentidos opostos com a mudança de velocidade do rotor [9] [10].

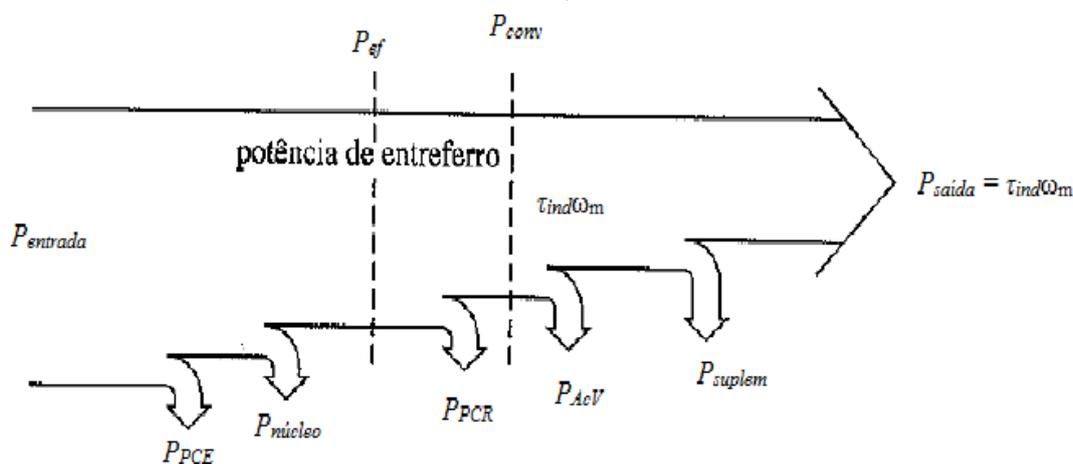


Figura 3 - Fluxo de potência de um Motor de Indução

Além da análise da potência e as perdas associadas as partes construtivas do motor, o conjugado produzido também é um fator importante pois determina a força de rotação que o motor possui durante um acionamento de uma determinada carga mecânica.

Há uma diferença entre conjugado induzido ( $\tau_{ind}$ ) e conjugado da carga, também chamado de torque eletromagnético ( $\tau_{carga}$ ). O primeiro associa a capacidade do rotor em gerar força para rotação desconsiderando as perdas rotacionais. Já o conjugado da carga é relacionado com velocidade real do eixo mecânico, ou seja, considerando as perdas rotacionais presentes nas partes construtivas do motor [9][10]. A equação (3) representa o torque eletromecânico. O parâmetro  $P_{saida}$  representa a potência entregue a carga mecânica, ou seja, potência consumida pelo motor.

$$\tau_{carga} = \frac{P_{saída}}{n_m 2\pi/60} \quad (3)$$

### 1.1.6 Partida do Motor de Indução

Uma tensão trifásica nominal aplicada diretamente aos terminais do estator leva a operação em regime permanente do motor de indução trifásico. Porém, a partida da máquina produz variações nas grandezas como tensão da rede elétrica, torque eletromecânico e correntes no estator e rotor que representam um transitório não vantajoso para os equipamentos e para o próprio sistema elétrico em si [8].

A desvantagem é associada ao aquecimento do motor e de todos os condutores ligados a ele reduzindo a vida útil dos mesmos. Além do sobreaquecimento, quedas de tensão na instalação elétrica, representadas por afundamento de tensão, podem ocorrer durante a partida do motor e representam um problema em potencial principalmente para dispositivos eletrônicos [7].

No momento da partida do motor, como o eixo mecânico encontra-se parado em relação ao campo girante inicial, há uma tensão induzida máxima, que corresponde ao valor de escorregamento igual a um. Com uma tensão induzida máxima, a corrente elétrica assume valores que variam de, aproximadamente, três a dez vezes a corrente nominal do motor. Outro fator que contribui para um alta magnitude na corrente de partida é que apenas a impedância do circuito limita a corrente em situações de arranque. Com o aumento da velocidade do eixo do motor, o escorregamento diminui e a força eletromotriz gerada pela campo magnético girante limita a corrente do sistema conduzindo para a operação em regime permanente do motor [9] [10].

A fim de ilustrar o transitório de partida, as figuras 4, 5 e 6 ilustram a corrente na fase A do estator, torque eletromecânico e a velocidade de rotação do eixo mecânico de um motor de indução trifásico. Nota-se que o regime permanente é alcançado depois 0,8 segundos de operação. Estes gráficos foram obtidos a partir da simulação deste trabalho.

É importante notar que durante o arranque do motor a tensão da rede elétrica pode sofrer afundamentos devido a alta corrente de partida gerada. Não é recomendado que tal queda de tensão ultrapasse 10% do valor nominal para não afetar a operação de outros dispositivos

ligados ao sistema [7]. Acionamentos de partida foram desenvolvidos com o avanço da eletrônica de potência para reduzir a corrente transitória de partida.

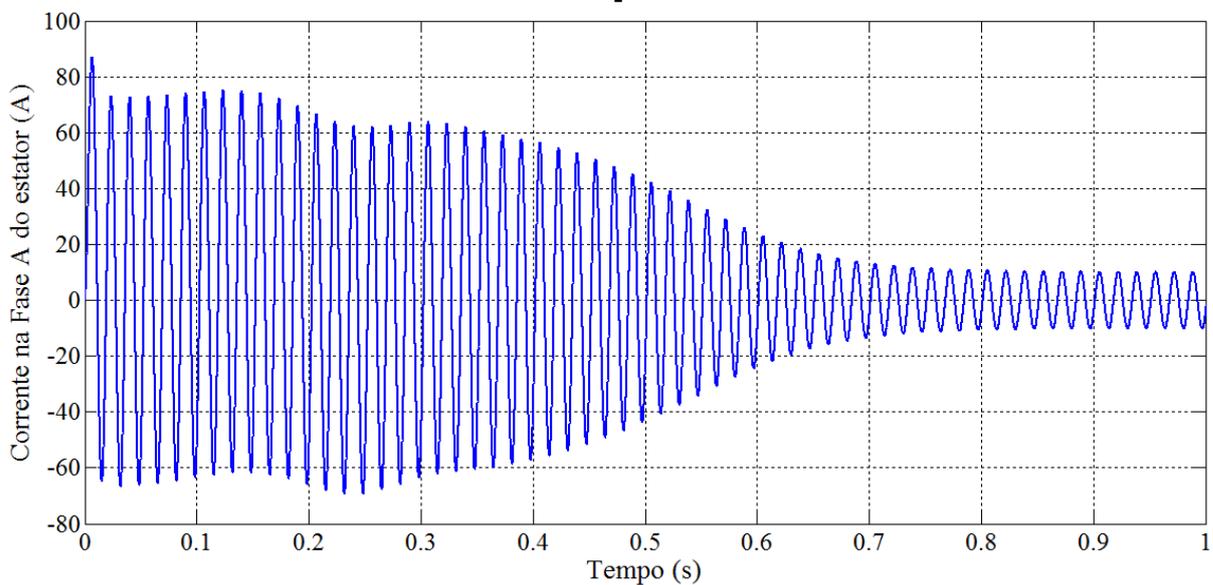


Figura 4 - Corrente na Fase A do estator durante a partida do motor

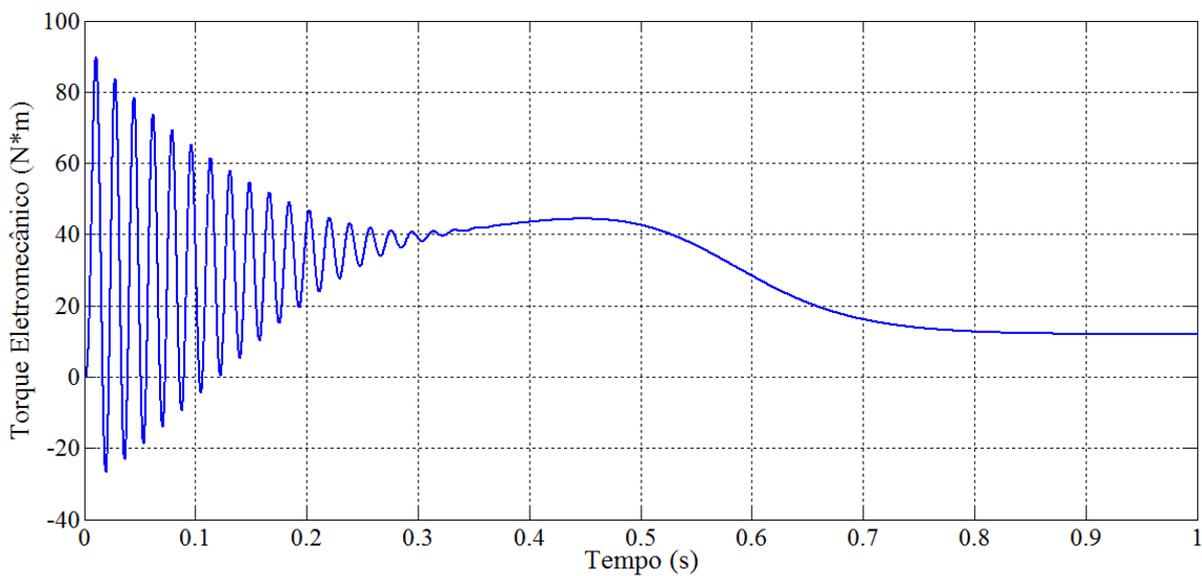


Figura 5 - Torque Eletromecânico durante a partida do motor

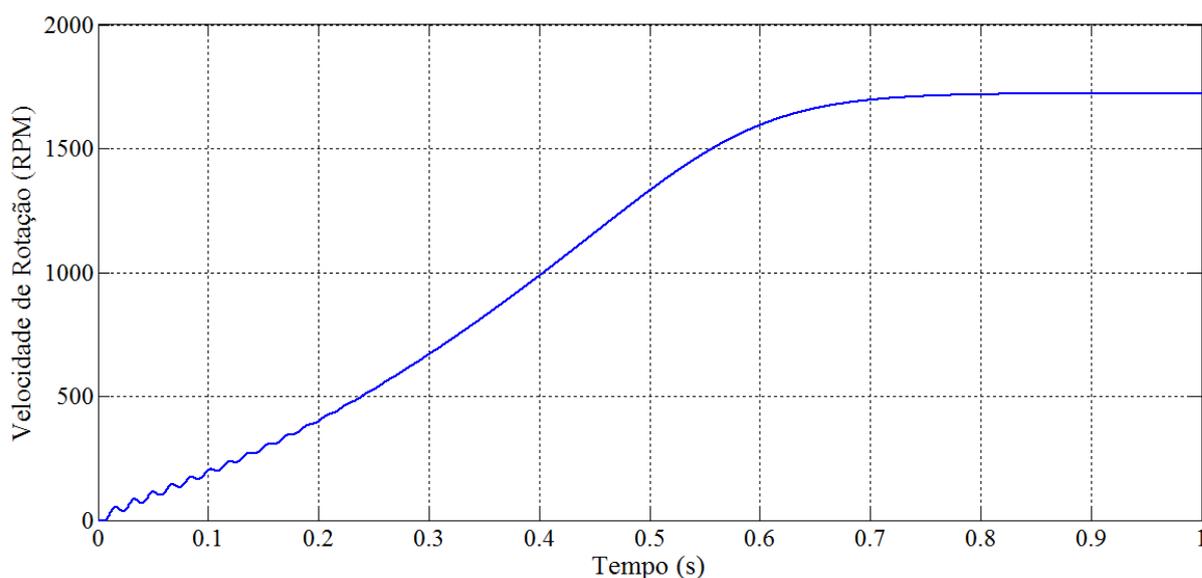


Figura 6 - Velocidade de rotação do eixo do motor durante a partida

## 1.2 Afundamento de Tensão de Curta Duração

### 1.2.1 Introdução

Afundamento de Tensão de Curta Duração é um distúrbio relacionado a QEE causado principalmente por curtos-circuitos além de que sobrecarga e acionamento de grande motores também são fatores para a ocorrência do evento. A motivação para o estudo dos afundamentos é devido a sensibilidade que equipamentos eletrônicos possui com variações de tensão. Inversores de frequência, computadores e controladores chaveados são dispositivos com alta capacidade de falha durante um afundamento de tensão [11].

De acordo com [1], afundamento de tensão compreende pela redução do valor RMS da tensão em valores que variam de 10% a 90% o valor nominal durante um período de 0,5 ciclos de frequência do sistema elétrica a um minuto. Uma representação para tal evento é presente na figura 7.

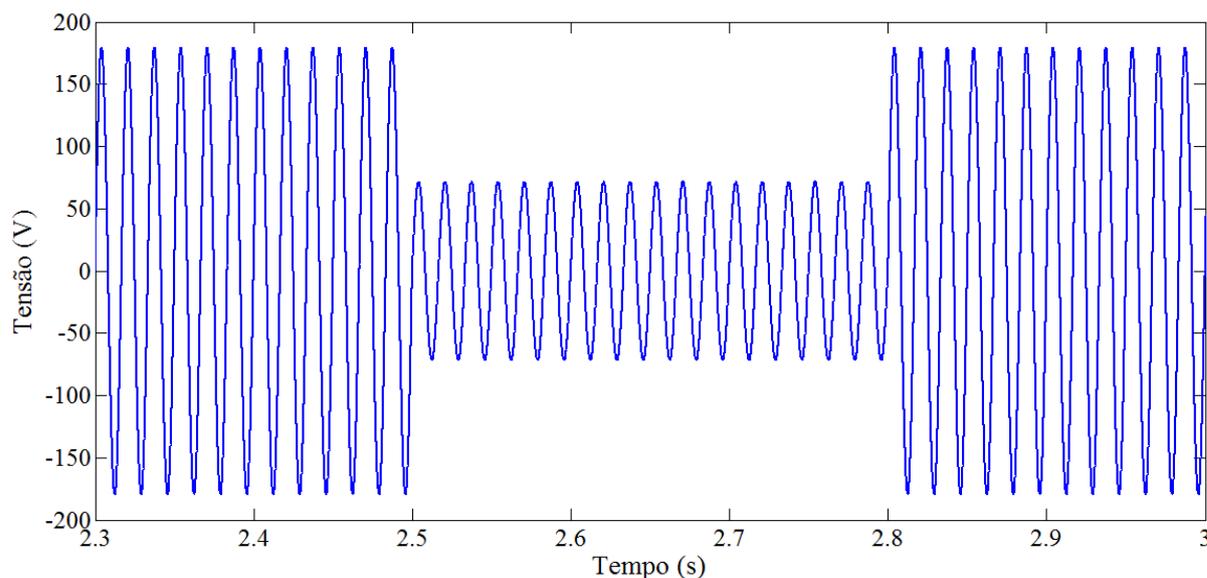


Figura 7 - Afundamento de tensão representado pela forma de onda

### 1.2.2 Análise do Afundamento de Tensão

As análises do afundamento de tensão compreende por duas formas básicas, obtenção da magnitude durante a tensão medida e a duração do evento [1].

Durante o evento, a magnitude da tensão referida reduz em relação ao valor nominal determinado onde tal valor pode ser considerado como tensão RMS medida. Para ser considerado um afundamento, a tensão RMS do afundamento precisa decair a um valor abaixo de 90% da tensão RMS medida [1]. Com isso, existe uma tensão residual que permanece durante o afundamento que é a tensão mínima RMS medida. Outra maneira de análise da magnitude do afundamento é a máxima amplitude do decaimento da tensão, em valores RMS, que é o resultado da diferença entre tensão RMS nominal e a mínima tensão RMS medida [6]. A figura 8, obtida em [6] ilustra uma caracterização do evento.

Outra forma de análise em relação à afundamentos de tensão é o tempo de duração do evento. Esta avaliação é bastante ligada ao tempo de atuação do disjuntor para eliminar a falta presente na rede uma vez que afundamentos de tensão são causados principalmente por curtos-circuito no sistema elétrico [1]. O tempo de duração para caracterização de um afundamento é de 0,5 ciclos da frequência nominal do sistema elétrico a um minuto. A figura 9, obtida em [6], ilustra uma análise em relação ao tempo duração do evento. Nota-se nas figuras 8 e 9 que um limite equivalente a 90% da tensão RMS medida é colocado de maneira a facilitar a visualização do início e término do afundamento de tensão de curta duração [6].

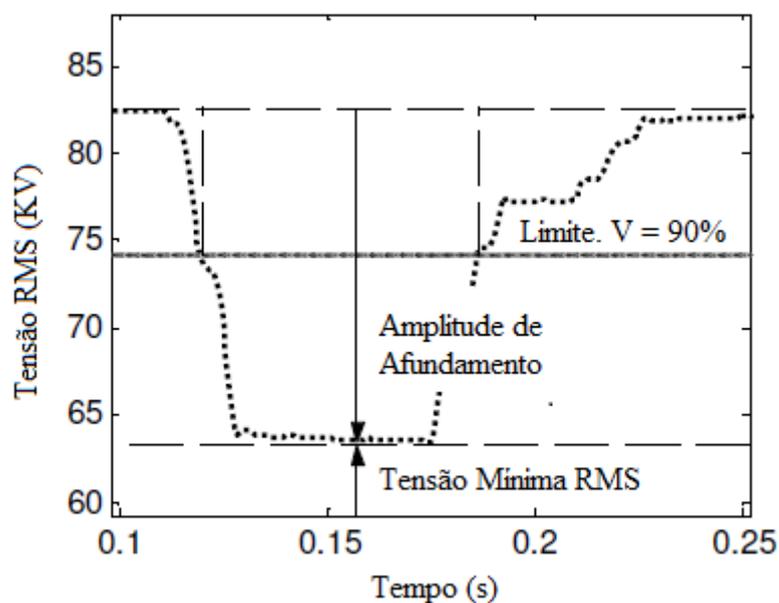


Figura 8 - Caracterização em relação a magnitude do evento afundamento de tensão, adaptada de [6]

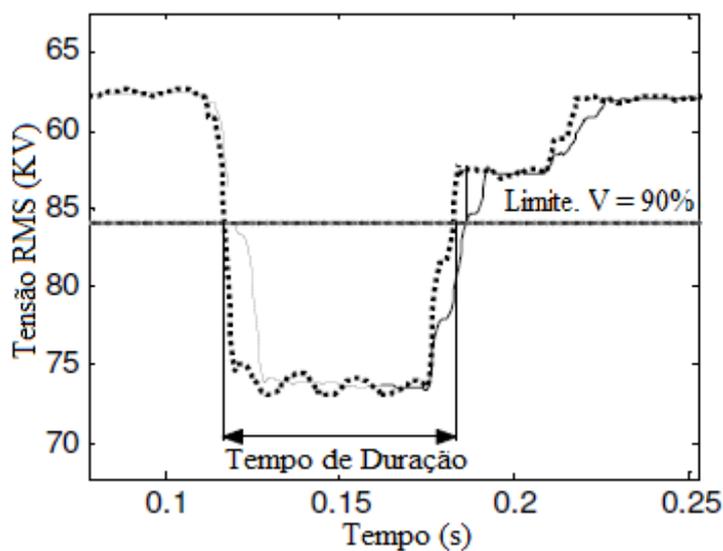


Figura 9 - Caracterização do afundamento de tensão em relação ao tempo, adaptada de [6]

### 1.2.3 Classificação e tipos de afundamento de tensão

De acordo com [2], o afundamento de tensão é classificado conforme o tempo de duração divididos em instantâneo, momentâneo e temporário. A tabela 2 representa tal classificação.

Tabela 2 - Classificação em relação ao tempo de ocorrência [2]

Classificação do evento	Tempo de duração do evento
Instantâneo	0,5 a 30 ciclos da frequência
Momentâneo	30 ciclos da frequência a 3 segundos
Temporário	3 segundos a 1 minuto

Em sistemas trifásicos, o afundamento de tensão ocorrido difere em magnitude e ângulo de fase para cada fase da rede elétrica. Isto pode ser verificado principalmente quando há ocorrências de faltas assimétricas no sistema resultando também em desequilíbrios de tensão [1] [12].

Uma representação presente na literatura apresenta os tipos de afundamento de tensão causados faltas simétricas e assimétricas na rede elétrica. Tal modelo classifica o afundamento de tensão em quatro tipos, tipo A, B, C e D, apresentados por fórmulas, modelo de complexo da tensão, e diagramas fasoriais [7]. A tensão representada nestes modelos refere a tensão fase-neutro do arranjo em questão.

O afundamento de tensão tipo A é causado por faltas simétricas presentes na rede elétrica [1]. A equações (4), (5) e (6) representam o modelo complexo de cada fase onde  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$  são tensões fase-neutro da fase A, B e C respectivamente.

$$V_A = h \quad (4)$$

$$V_B = -\frac{h}{2} - \frac{jh\sqrt{3}}{2} \quad (5)$$

$$V_C = -\frac{h}{2} + \frac{jh\sqrt{3}}{2} \quad (6)$$

Os afundamentos de tensão tipo B, C e D são resultados de faltas assimétricas no circuito elétrico. As equações (7), (8) e (9) expressam o modelo para o tipo B, (10), (11) e (12) para o tipo C e (13), (14) e (15) para o tipo D [12].

$$V_A = h \quad (7)$$

$$V_B = -\frac{1}{2} - \frac{j\sqrt{3}}{2} \quad (8)$$

$$V_C = -\frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2} \quad (9)$$

$$V_A = h \quad (10)$$

$$V_B = -\frac{1}{2} - \frac{jh\sqrt{3}}{2} \quad (11)$$

$$V_C = -\frac{1}{2} + \frac{jh\sqrt{3}}{2} \quad (12)$$

$$V_A = h \quad (13)$$

$$V_B = -\frac{h}{2} - \frac{j\sqrt{3}}{2} \quad (14)$$

$$V_C = -\frac{h}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2} \quad (15)$$

Nota-se nas equações que representam os modelos matemáticos dos afundamentos de tensão uma grandeza  $h$ . Tal termo refere a severidade do decaimento da magnitude da tensão e a modificação do ângulo de fase durante o evento. Seus valores variam de 0 a 1. A influência deste fator é determinada pela severidade da falta associada ao afundamento de tensão de maneira que quanto menor o valor de  $h$ , maior a severidade do curto circuito e maior o decaimento da tensão, uma vez que a principal causa de tal evento se deve faltas no sistema elétrico [1].

A figura 10 ilustra o diagrama fasorial de cada modelo de afundamento de tensão definido por tipos A, B, C e D. A posição dos fasores de uma tensão trifásica ideal (defasados em  $120^\circ$  e com mesma magnitude) também é colocada na figura a fim de visualizar uma comparação associada a amplitude e abertura angular de cada fase.

Além do tipo do curto-circuito presente, a conexão da carga também influencia no tipo de afundamento de tensão produzido [1]. A tabela 3 resume os principais tipos de afundamentos associados aos tipos de falta combinado a conexão delta ou estrela da carga em questão.

Tabela 3 - Tipo da falta e conexão da carga relacionados aos tipos de afundamentos [6]

<b>Tipo da falta</b>	<b>Conexão Estrela</b>	<b>Conexão Delta</b>
Trifásica	Afundamento tipo A	Afundamento tipo A
Fase-Fase	Afundamento tipo C	Afundamento tipo D
Fase-Terra	Afundamento tipo B	Afundamento tipo B

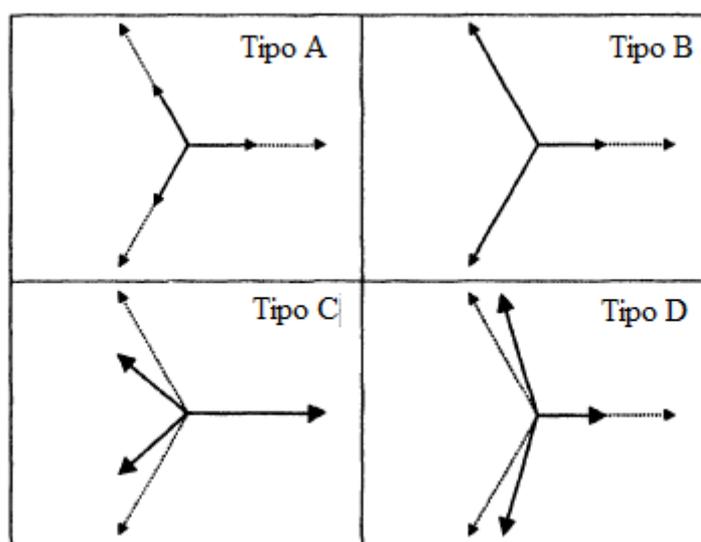


Figura 10 - Diagrama Fasorial dos tipos de afundamentos de tensão

## 1.4 Objetivo Geral

A vista das motivações presentes, este trabalho tem o objetivo de analisar o comportamento de um motor de indução trifásico, através de simulações, quando o mesmo é submetido a operação com afundamento de tensão, distúrbio relacionado a QEE.

Para um completo estudo deste comportamento, os objetivos específicos são definidos em:

- Analisar a tensão, com relação a magnitude e duração do evento, presente na alimentação trifásica para cada tipo de afundamento simulado;
- Gerar resultados sobre o comportamento do motor de indução durante cada tipo de afundamento de tensão;
- Avaliar o grau de severidade do afundamento ( $h$ ) relacionando com as análises na tensão e no comportamento do motor de indução.

## 2 *Materiais e Métodos*

Visando os objetivos traçados neste projeto combinado as motivações atribuídas, uma simulação foi realizada associando o estudo de afundamento de tensão com a operação de um motor de indução trifásico.

O ambiente de simulação utilizado foi o Simulink que corresponde a uma *toolbox* do software Matlab®. Com esta plataforma, o comportamento do motor de indução associado a afundamento de tensão foi simulado e analisado. A figura 11 ilustra a interface do projeto simulado que corresponde a fonte de alimentação trifásica conectada diretamente a um motor de indução trifásico com rotor gaiola de equilo.

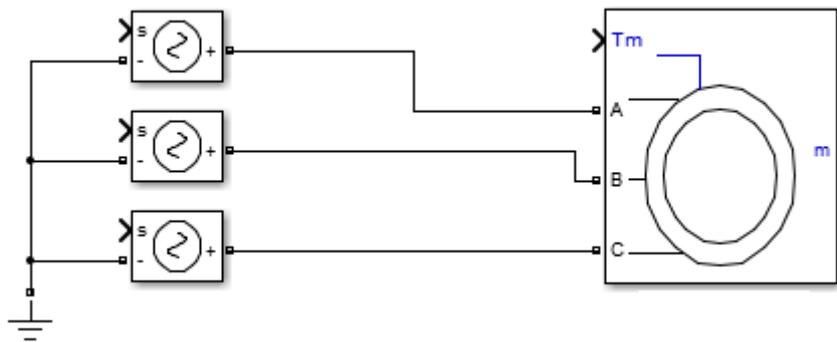


Figura 11 - Interface da simulação realizada

### 2.1 *Descrição do Motor de Indução utilizado*

O circuito apresentado na figura 11 refere-se a um acionamento de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de equilo. Para realizar análises e simulações com relação ao seu comportamento durante qualquer operação é necessário possuir as grandezas elétricas e mecânicas.

A tabela 4 apresenta parâmetros nominais de operação do motor. Já a tabela 5 refere as grandezas presente no circuito equivalente ilustrado na figura 2. Estes termos foram utilizados para a simulação e foram obtidos a partir de [13] que é um trabalho onde descreve as características do motor de indução a partir de uma fonte distorcida com harmônicos.

Tabela 4 - Parâmetros nominais do motor de indução utilizado

Potência	3 HP
Pólos	4
Tensão de Linha	220 V
Frequência	60 Hz
Torque Eletromecânico Nominal	11,9 N*m
Corrente Nominal	8,483 A
Escorregamento Nominal	0,0404
Velocidade Nominal	1725 RPM

Tabela 5 - Parâmetros em relação ao circuito equivalente do motor de indução

Resistência do estator ( $R_1$ )	0,435 $\Omega$
Reatância do estator ( $X_1$ )	4 mH
Reatância de magnetização ( $X_M$ )	69,31 mH
Reatância do rotor ( $X_2$ )	2 mH
Resistência do rotor ( $R_2$ )	0,816 $\Omega$

## 2.2 Metodologia de Simulação para o afundamento de tensão

A metodologia utilizada nesta simulação, representada pela figura 11, foi implementada de maneira a estudar o comportamento do motor durante um evento de afundamento de tensão momentâneo, implementado na própria tensão de alimentação do sistema. Para isto, a simulação tem uma duração de cinco segundos para uma maior visualização dos transitórios e do regime permanente antes, durante e após a ocorrência do distúrbio analisado.

Basicamente, o modelo de simulação consiste em uma aplicação de uma fonte trifásica de alimentação com tensão de linha equivalente a 220 V combinadas a afundamentos de tensão, representados na seção 1.2.3 deste trabalho, aos terminais de um motor de indução. A reprodução do sinal referente a alimentação trifásica equivale a uma amostragem de  $5 \cdot 10^{-5}$  segundos. Este tempo de amostragem é consolidado para todas as simulações realizadas.

Cada afundamento momentâneo de tensão representado por tipo A, B, C e D é simulado durante um intervalo de 2,5 segundos a 2,8 segundos. As relações matemáticas representadas por (4) a (15) são aplicadas a tensões fase-neutro no sistema trifásico simulado. Além da variação do tipo do afundamento nas simulações, o termo  $h$ , relacionado com a severidade do afundamento de tensão, é variado em três valores para cada tipo de afundamento simulado com relação a análise da tensão durante o evento. Os valores assumidos para a grandeza  $h$  são equivalentes a 0,1; 0,5; 0,8. Esses três valores são colocados aqui na metodologia para uma melhor visualização dos tipos de afundamento durante suas severidades. A tensão rms nominal considerada foi equivalente a 127 V e utilizada como tensão base para representação dos resultados. Tais resultados são apresentados em gráficos que representam a tensão fase-neutro nas fases A, B e C para cada tipo de (A, B, C e D) e severidade ( $h$ ) de afundamento de tensão.

Como esses afundamentos são gerados na fonte de alimentação, as seções a seguir mostram os quatro tipos estudados e simulados. Essas tensões geradas fazem parte da metodologia utilizada pra se chegar aos resultados principais, que são as variações dos parâmetros do motor durante a ocorrência dos *sags*.

### **2.2.1 Afundamento tipo A**

O afundamento de tensão tipo A foi aplicado ao motor conforme a metodologia presente neste trabalho. Este modelo possui uma característica de um decaimento igual em magnitude para as três fases do sistema elétrico.

A figura 12 e 13 apresenta a tensão fase-neutro na fase A na forma senoidal e o valor rms ponto a ponto em pu (por unidade) para cada valor do parâmetro  $h$ . O gráfico da tensão na fase B e C possui a mesma forma demonstrados na figura 12 e 13 e por este motivo apenas a tensão na fase A foi representada. Isto ocorre devido ao tipo A de afundamento de tensão ser resultante de faltas simétricas onde a tensão durante o evento decai de forma equilibrada [1].

Nota-se, por meio das figuras 12 e 13, que a severidade do afundamento, representado por  $h$ , influencia diretamente na magnitude da tensão analisada. A tensão fase-neutro RMS mostrada na figura 13 é determinada por tal grandeza.

A tensão mínima RMS, a amplitude e a duração para cada severidade de afundamento de tensão são colocados na tabela 6. Estes valores foram obtidos a partir do sinal amostrado presente na figura 13. É importante notar que estes valores são iguais para as três fases devido a causa principal, falta simétrica [12].

Tabela 6 - Parâmetros com relação ao afundamento de tensão tipo A aplicado

Severidade, $h$	$h = 0.1$	$h = 0.5$	$h = 0.8$
Tensão mínima RMS (V)	12,70	63,50	101,60
Amplitude do afundamento (V)	114,30	63,50	25,40
Duração do afundamento (ms)	309,20	308,20	308,20

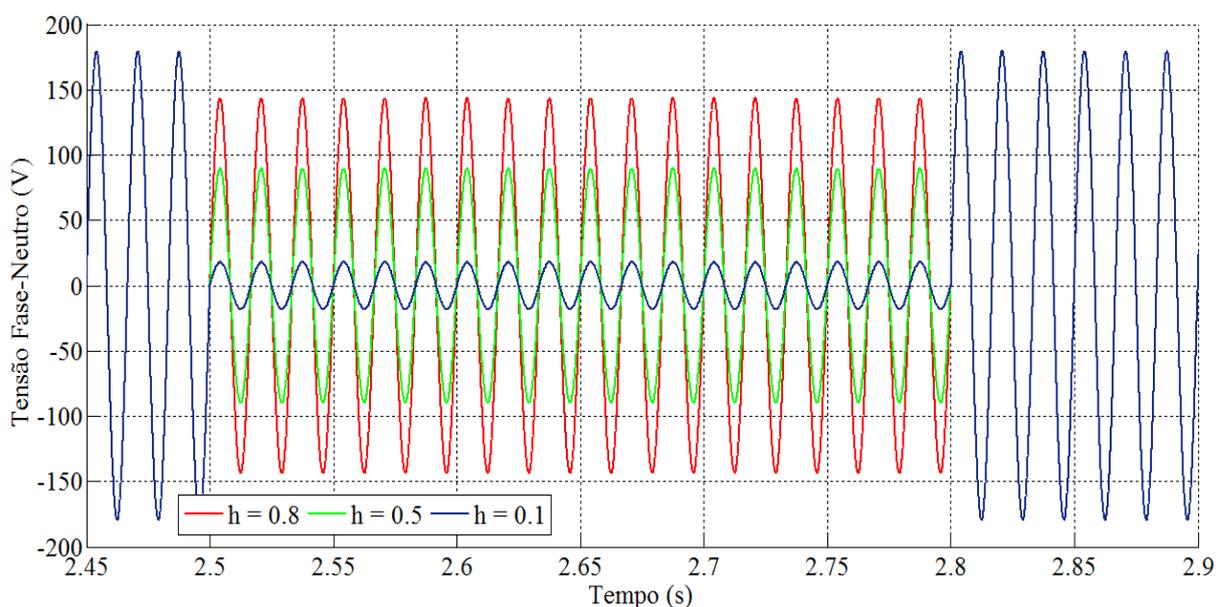


Figura 12 - Forma de onda da tensão fase-neutro na fase A durante um afundamento de tensão tipo A

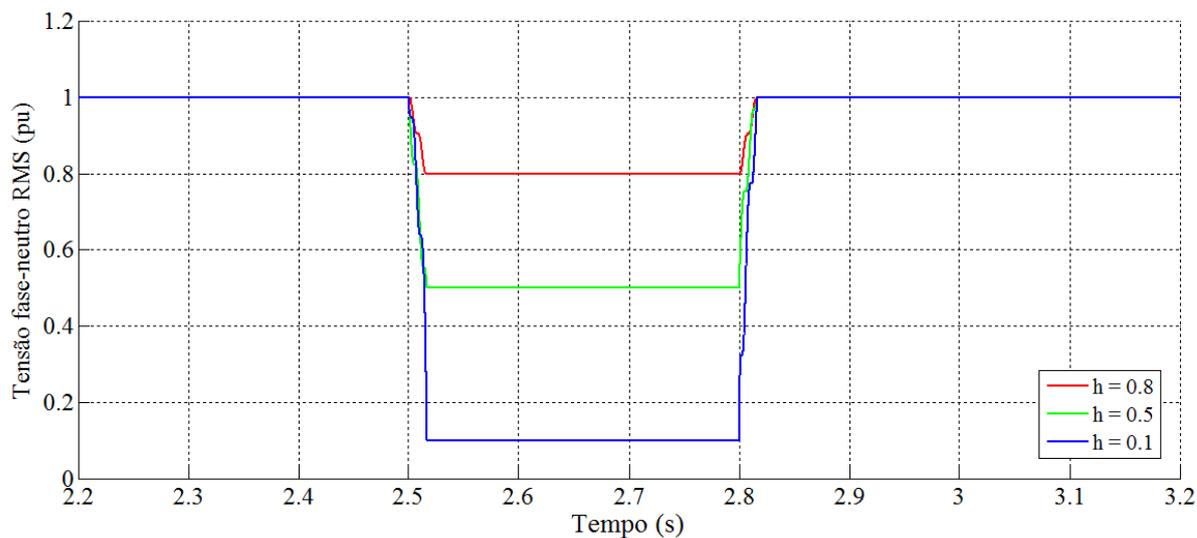


Figura 13 - Tensão fase-neutro RMS (pu) da fase A durante um afundamento de tensão tipo A

### 2.2.2 Afundamento tipo B

O afundamento tipo B é descrito pelas equações (7), (8) e (9) para as fases A, B e C. De acordo com o diagrama fasorial presente na figura 10, apenas uma fase sofre decaimento em relação a magnitude da tensão.

A aplicação deste afundamento durante a simulação do motor resultou na modificação apenas na fase A do sistema trifásico. A tensão fase-neutro da fase A apresenta as mesmas características ilustradas na figura 12 e 13 e na tabela 6. A diferença que existe neste tipo de afundamento para o tipo A é causa presente onde o afundamento tipo B relaciona com uma falta fase-terra (falta assimétrica) resultando em uma modificação apenas na fase em que sofre o curto-circuito [1]. A figura 14 apresenta a forma de onda de tensão fase-neutro para as três fases com o parâmetro  $h$  equivalente a 0,5.

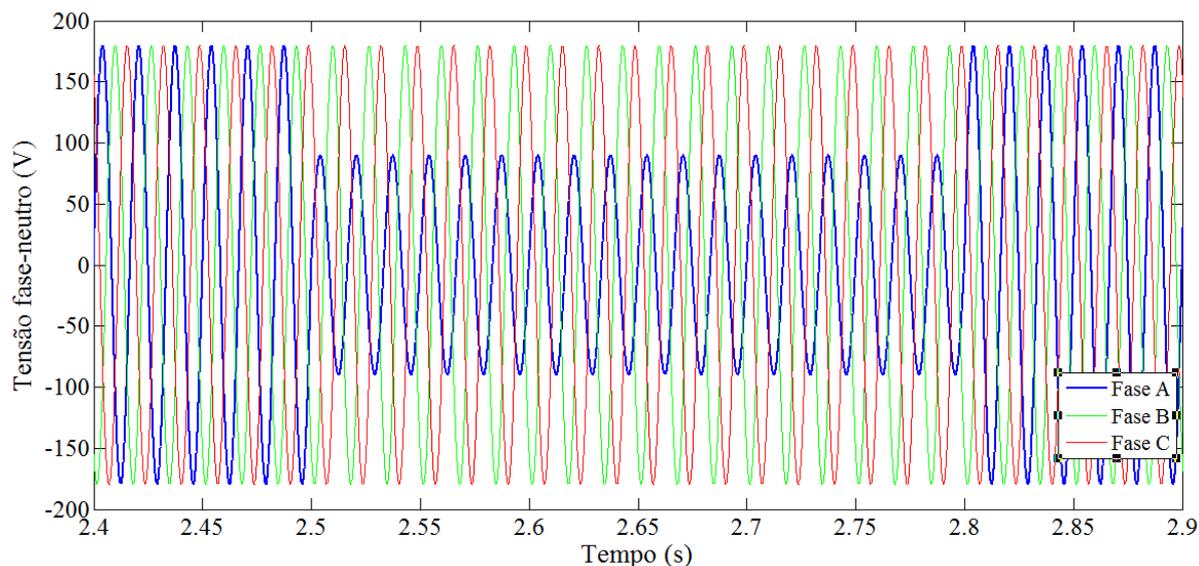


Figura 14 - Tensão fase-neutro das fases A, B e C durante um afundamento de tensão tipo B

### 2.2.3 Afundamento tipo C

O afundamento de tensão tipo C é aplicado ao sistema. A figura 15 apresenta a tensão fase-neutro das três fases onde corresponde com o diagrama fasorial ilustrado na figura 10 uma vez que a tensão na fase B e C apresentam a mesma variação com relação a amplitude da onda. A severidade do afundamento aplicado na figura 15 é igual a 0,5.

Este afundamento de tensão é originado por curtos-circuitos assimétricos relacionada a duas fases do sistema trifásico, ou seja, falta fase-fase (FF) e fase-fase-terra (FFT) [1]. Na figura 15 nota-se que o evento acontece em duas fases do sistema.

Na simulação deste afundamento, as fases B e C sofreram afundamento de tensão, portanto os valores com relação a magnitude de tensão são similares. A figura 16 apresenta a tensão fase-neutro RMS, em pu, da fase B para diferentes severidades de afundamento de tensão. A tabela 7 mostra parâmetros com relação ao afundamento tipo C na fase B similar a tabela 6.

Nota-se nos valores colocados na tabela 7 que quando ocorre a maior severidade do afundamento ( $h = 0,1$ ), a tensão mínima RMS que caracteriza a magnitude do afundamento de tensão equivale a 50,74% da tensão RMS nominal. Isto difere do afundamento tipo A uma vez que com a mesma severidade a tensão mínima RMS equivale ao valor mínimo para caracterização de um afundamento de tensão. Essa diferença é causada devido que faltas simétricas, relacionada ao tipo A de afundamento, tendem a ser mais severas em relação a fase

assimétrica (neste caso, falta fase-fase ou fase-fase-terra) que associa diretamente com o nível de decaimento da tensão durante tal evento [1] [6].

Tabela 7 - Parâmetros com relação ao afundamento de tensão tipo C aplicado

Severidade, $h$	$h = 0,1$	$h = 0,5$	$h = 0,8$
Tensão mínima RMS (V)	64,45	84,02	108,51
Amplitude do afundamento (V)	62,55	42,98	18,49
Duração do afundamento (ms)	308,20	306,50	292,50

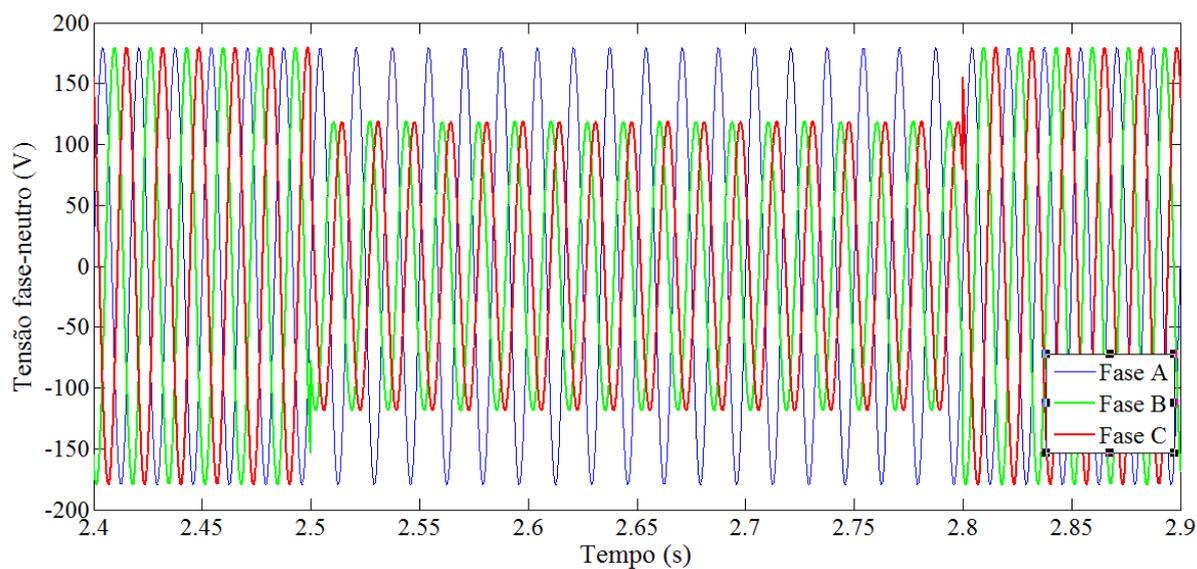


Figura 15 - Tensão fase-neutro das fases A, B e C durante um afundamento de tensão tipo C

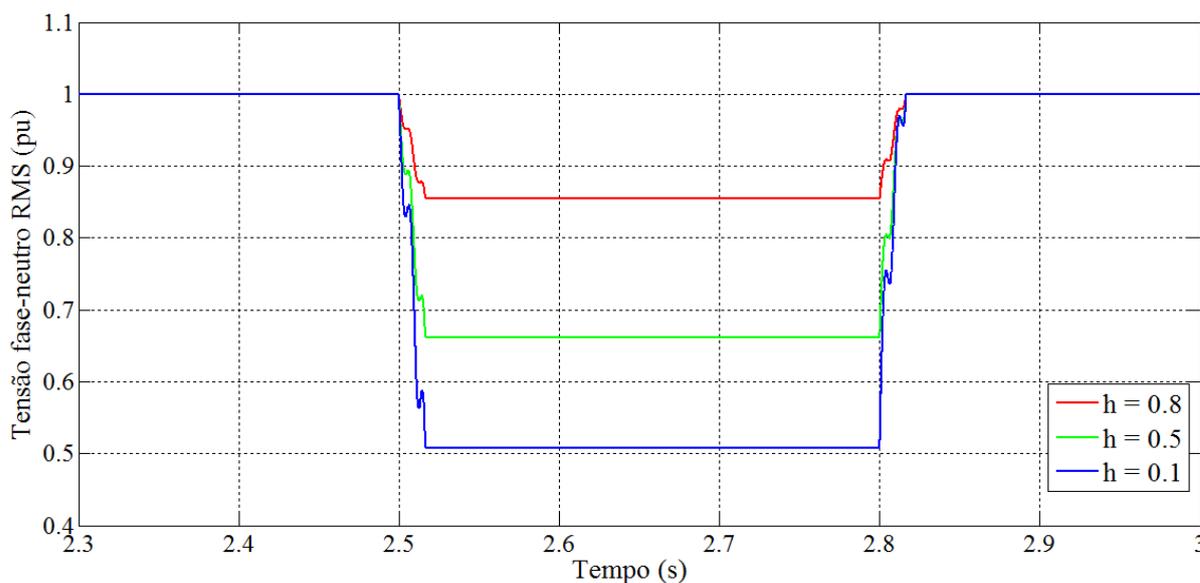


Figura 16 - Tensão fase-neutro RMS (pu) da fase B durante um afundamento de tensão tipo C

### 2.2.4 Afundamento tipo D

Por fim, o afundamento tipo D é aplicado ao sistema. É caracterizado por um afundamento que associa as três fases conforme indicado no diagrama fasorial indicado na figura 10 de maneira a variar a magnitude de forma diferente entre as fases.

De acordo com as equações descritas por (13) a (15), a magnitude das fases B e C são iguais durante o evento onde a fase A é a que possui o maior nível de decaimento da tensão. A figura 17 apresenta uma visão geral ( $h = 0,5$ ) sobre a tensão fase-neutro nas três fases durante um afundamento de tensão tipo D. A ocorrência da mesma magnitude para as fases B e C associa diretamente com a causa relacionada a este evento que são faltas fase-fase e fase-fase-terra no sistema elétrico [6]. A diferença que existe entre este afundamento e o tipo C é a forma de conexão da carga ligada a fonte de alimentação. Conexões em estrela relacionam com o tipo C de afundamento enquanto cargas em delta associam ao tipo D [1].

Para uma análise mais precisa sobre o comportamento de tal afundamento, o índice  $h$ , conforme descrito na metodologia do trabalho, foi variado em três valores. A figura 18 e 19 ilustra a tensão fase-neutro RMS da fase A e B, respectivamente, conforme tal método. A tensão referente a fase C não foi plotada devido possuir o mesmo formato da figura 19.

Os parâmetros com relação ao afundamento de tensão tipo D são colocados nas tabelas 8 e 9 para as fases A e B respectivamente. Na tabela 9 são colocados apenas valores para a maior severidade de afundamento ( $h = 0,1$ ) uma vez que apenas nesta situação a fase B

apresentou características de afundamento de tensão. Para uma severidade média de afundamento ( $h = 0,5$ ), a tensão fase-neutro na fase B apresenta uma redução maior que 90% da tensão nominal, porém, a duração deste evento é menor que 0,5 ciclos da frequência elétrica do sistema sendo, portanto, não caracterizado como afundamento de tensão.

Tabela 8 - Parâmetros associados ao afundamento de tensão D na fase A

Severidade, $h$	$h = 0,1$	$h = 0,5$	$h = 0,8$
Tensão mínima RMS (V)	12,70	63,50	101,60
Amplitude do afundamento (V)	62,55	42,98	18,49
Duração do afundamento (ms)	309,20	308,20	308,20

Tabela 9 - Parâmetros relacionados ao afundamento tipo D para a fase B

Severidade, $h$	$h = 0,1$
Tensão mínima RMS (V)	104,59
Amplitude do afundamento (V)	22,41
Duração do afundamento (ms)	308,20

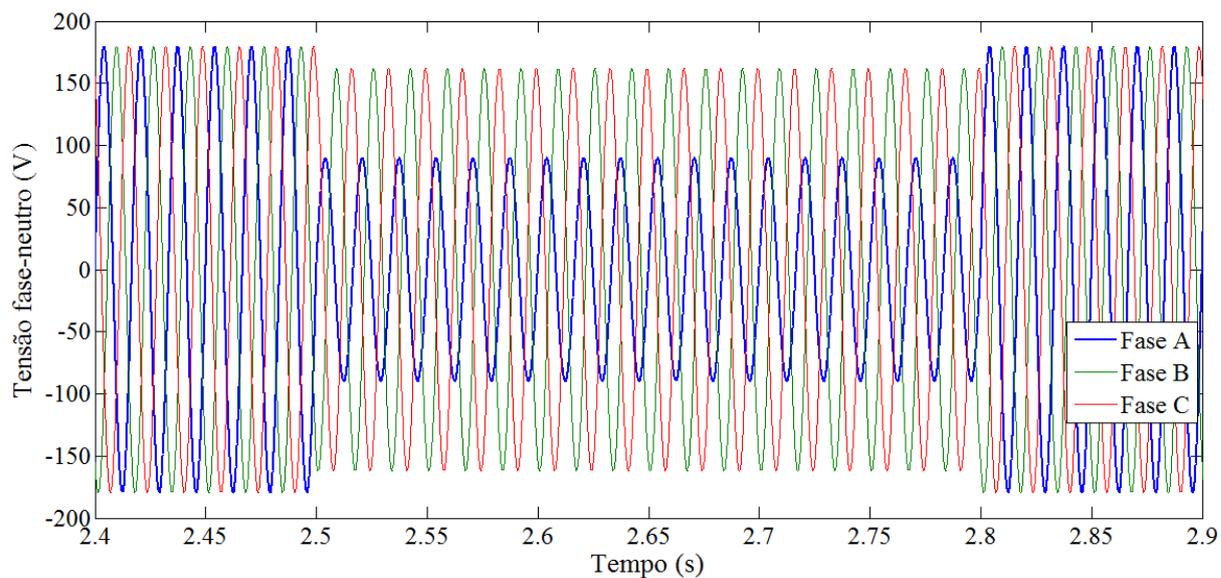


Figura 17 - Tensão fase-neutro das três fases durante um afundamento de tensão tipo D

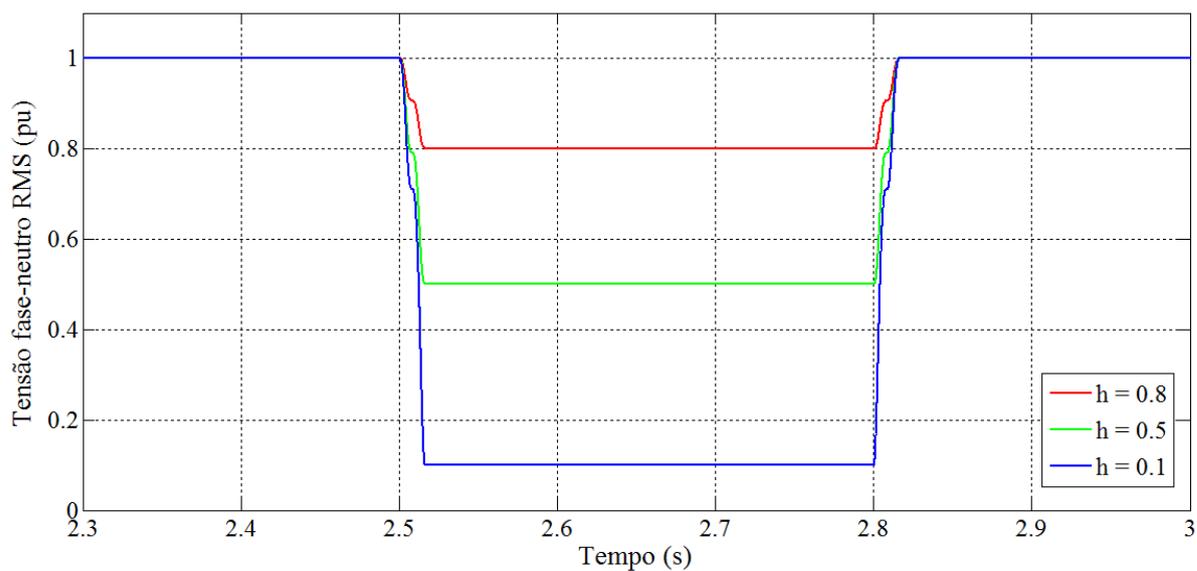


Figura 18 - Tensão fase-neutro RMS (pu) da fase A durante um afundamento de tensão tipo D

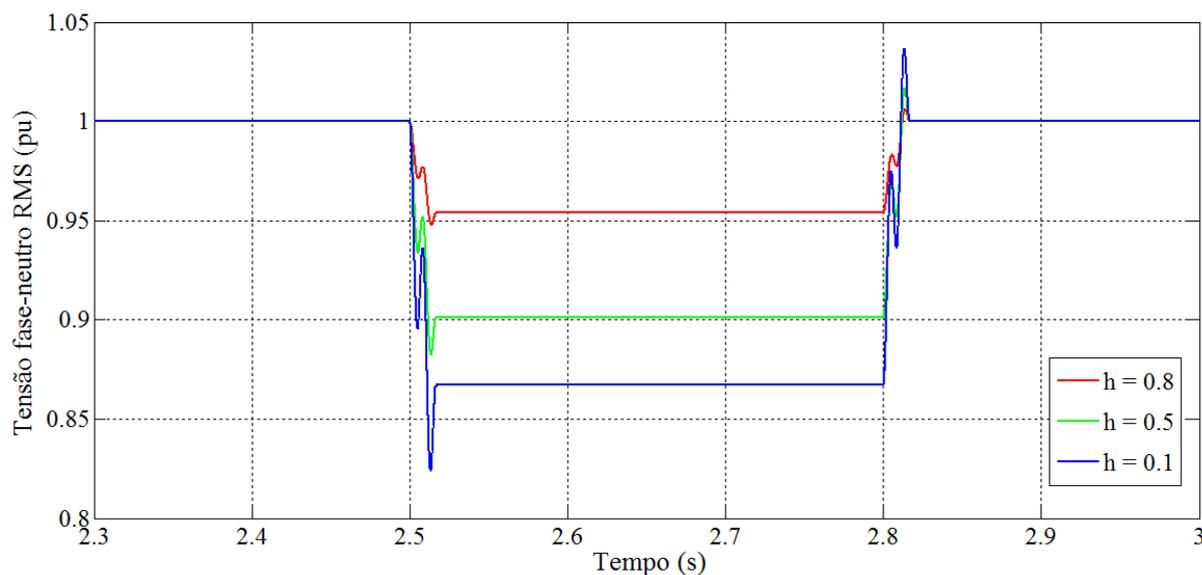


Figura 19 - Tensão fase-neutro RMS (pu) da fase B durante um afundamento de tensão tipo D

Com a metodologia de simulação definida, foi possível analisar a tensão aplicada nos terminais do motor e o comportamento do mesmo durante um evento de afundamento de tensão. Parâmetros relacionados ao motor como o torque eletromecânico, correntes no estator, perdas e potências foram analisados durante toda a simulação com ênfase no intervalo de ocorrência do afundamento e são apresentados no capítulo de Resultados a seguir.

### ***3 Resultados e Discursões***

Para uma melhor compreensão da relação entre fundamentos teóricos e a metodologia deste trabalho, os resultados foram divididos em duas subseções onde a primeira aborda as análises dos parâmetros relacionados ao comportamento do motor de indução e a segunda, a consequência das correntes estáticas durante o evento afundamento de tensão.

#### ***3.1 Análise do comportamento do Motor de Indução durante os Afundamentos de Tensão***

O motor de indução trifásico, descrito na seção 2 deste trabalho, foi alimentado por uma fonte trifásica submetida aos tipos de afundamento de tensão de curta duração conforme a metodologia de simulação.

Em todas as simulações, os transitórios relacionados ao arranque do motor são cessados com aproximadamente 0,7 a 0,8 segundos após a alimentação trifásica ser estabelecida. Com os afundamentos simulados após o instante 2,5 segundos, a partida da carga não influencia sobre tal evento e vice-versa. A figura 20 ilustra a corrente das três fases no estator durante a partida até o momento da operação em regime permanente.

Os resultados são descritos para cada tipo de afundamento de tensão apresentado neste trabalho. O fator severidade do afundamento,  $h$ , foi variado em dois valores para análise do comportamento do motor em cada tipo de afundamento de tensão.

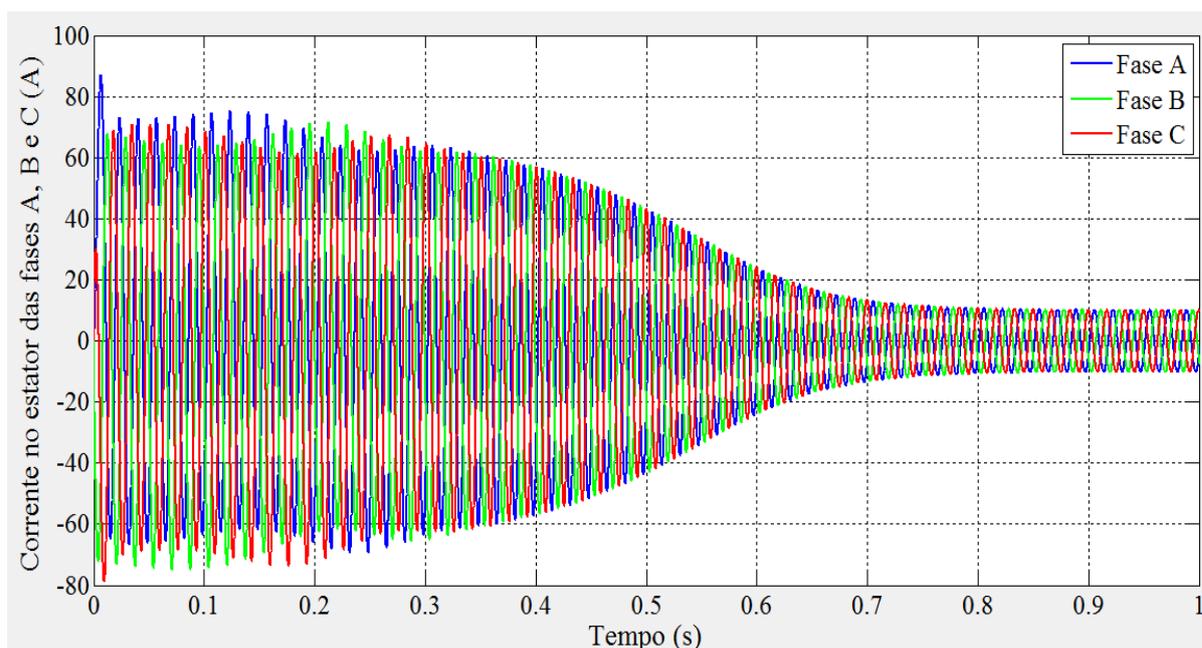


Figura 20 - Correntes do estator por fase (A) durante a partida do motor até a estabilização

### 3.1.1 Resultados a partir do afundamento de tensão tipo A

Os resultados da operação do motor durante um afundamento de tensão tipo A é descrito nesta seção. Os gráficos são analisados a partir da variação da severidade do afundamento em dois valores, 0,3 e 0,8.

As causas do afundamento de tensão tipo A são relacionadas a faltas simétricas no sistema elétrico e as fases tem um decaimento igual em relação a magnitude da tensão (Figura 12). Durante este momento, o campo magnético girante presente no entreferro da máquina é desbalanceado com a tensão nos terminais do estator ocasionando uma redução em tal grandeza [1]. A consequência direta a partir disto é a redução do torque eletromecânico do motor e uma redução na velocidade de rotação do eixo [14]. As figuras 21 e 22 ilustram o torque eletromecânico e a velocidade de rotação, respectivamente, para dois tipos de severidade de afundamento.

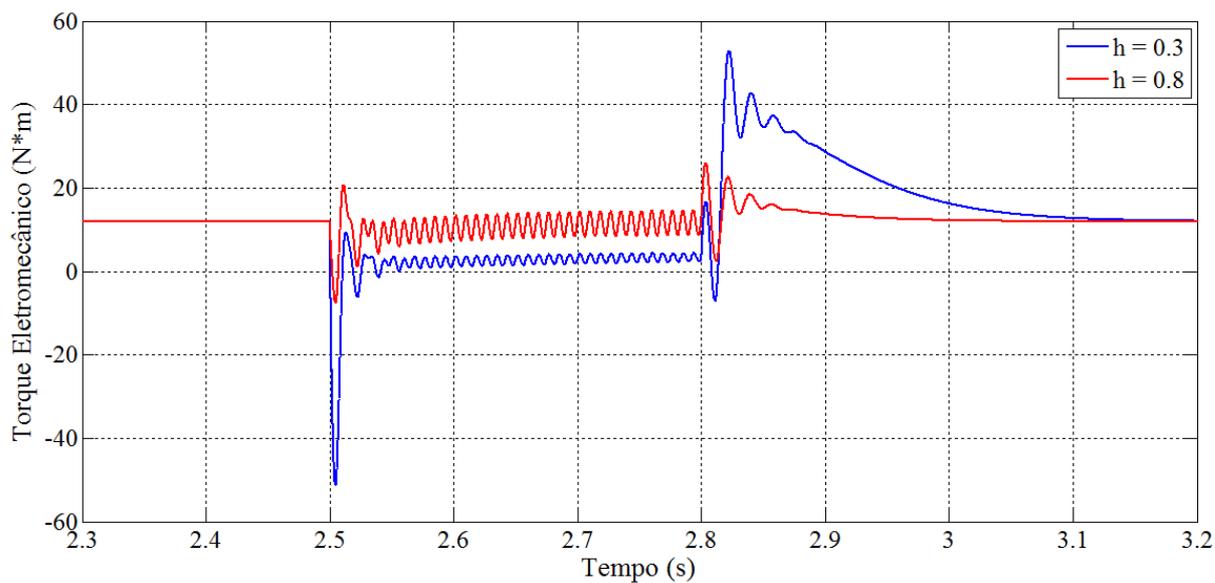


Figura 21 - Torque Eletromecânico (N\*m) do motor de indução durante afundamentos de tensão tipo A

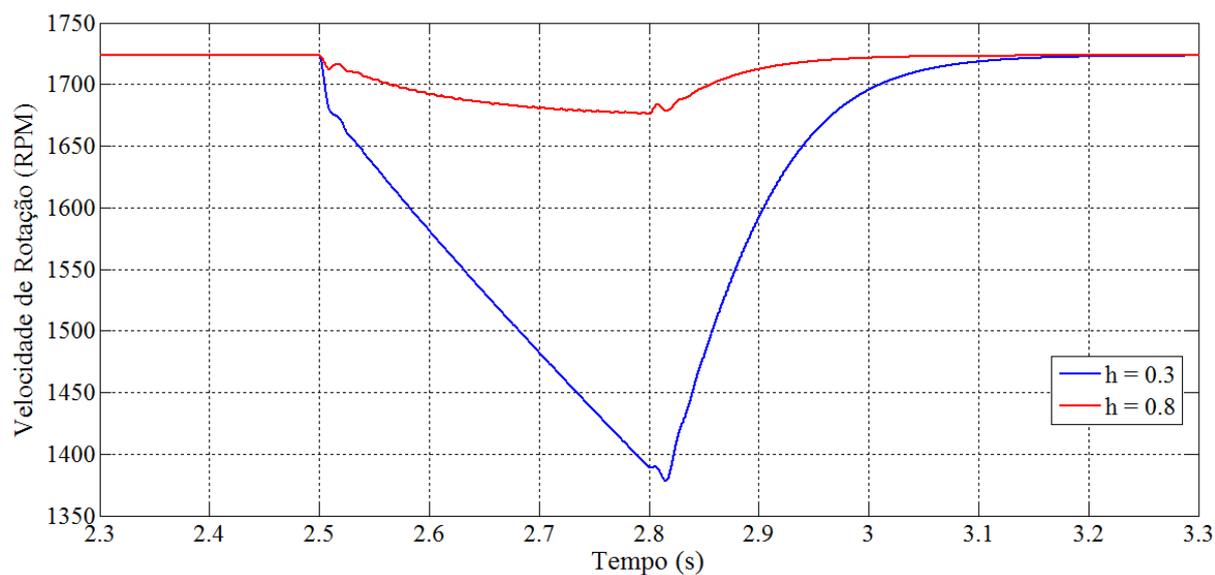


Figura 22 - Velocidade de Rotação (RPM) do eixo do motor de indução durante afundamentos de tensão tipo A

Com a variação do torque eletromecânico, consequência do desbalanceamento entre o campo girante e a tensão no estator devido ao afundamento tipo A, o escorregamento também apresenta variações durante tal evento. A figura 23 ilustra o escorregamento durante o afundamento de tensão tipo A.

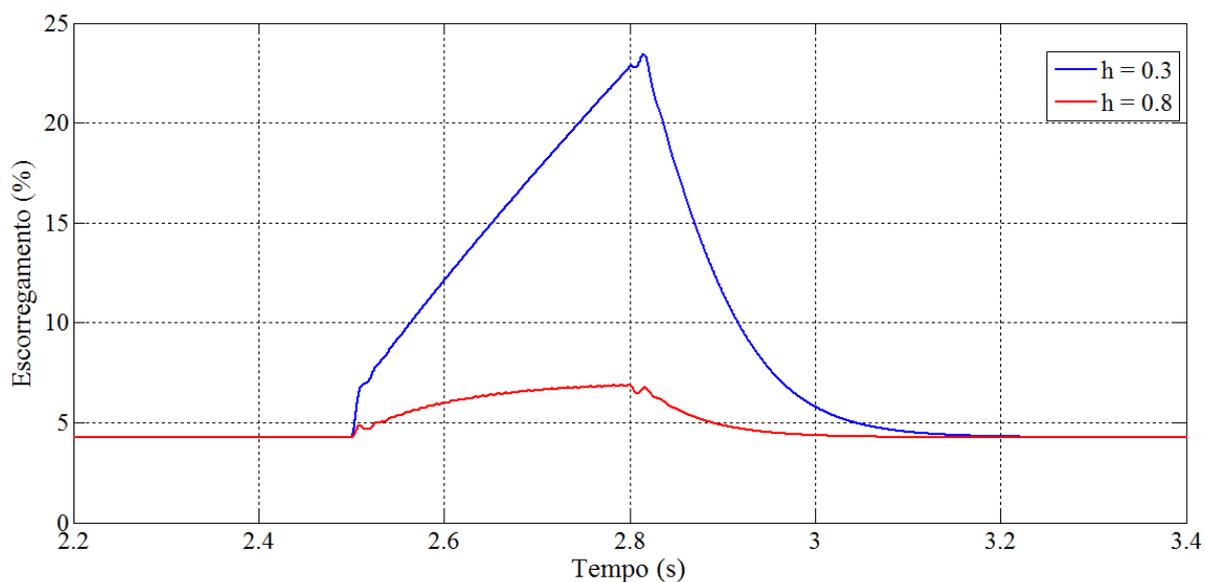


Figura 23 - Escorregamento (%) do motor de indução durante o afundamento de tensão tipo A

As correntes das fases A, B e C que circulam no estator da máquina possuem comportamentos semelhantes durante o afundamento do tipo A (*sag* simétrico). Por isso, a figura 24 ilustra somente os valores RMS da corrente da fase A.

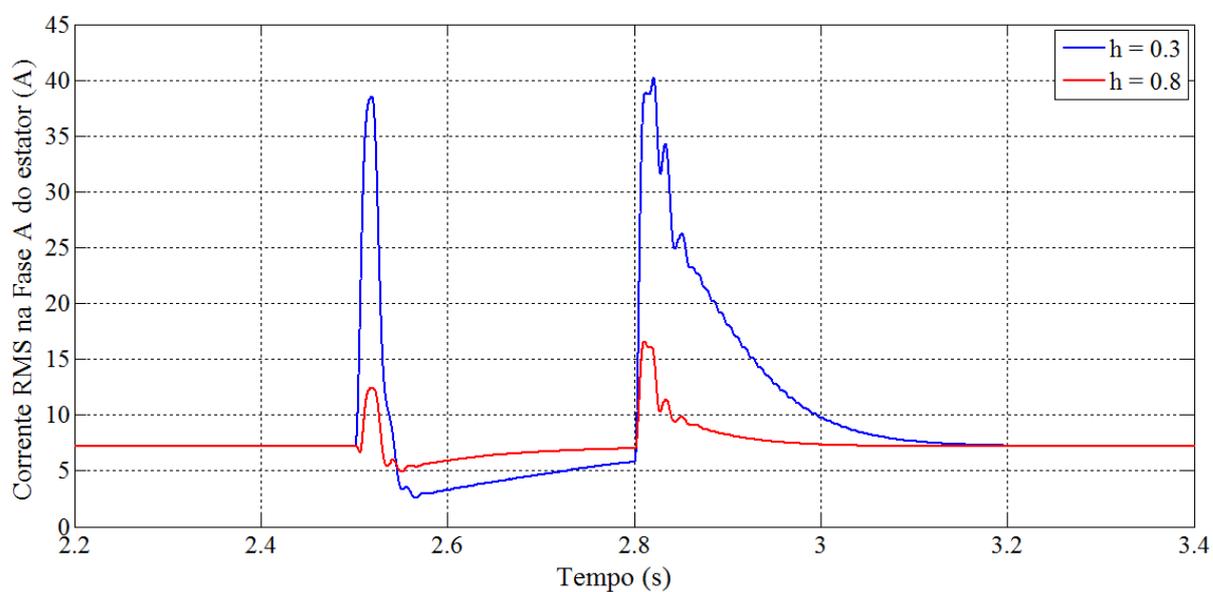


Figura 24 - Corrente RMS na Fase A do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo A

Além da corrente, a potência ativa é mostrada na figura 25 e a potência reativa na figura 26 que correspondem ao consumo do motor de indução durante a operação do afundamento de tensão tipo A.

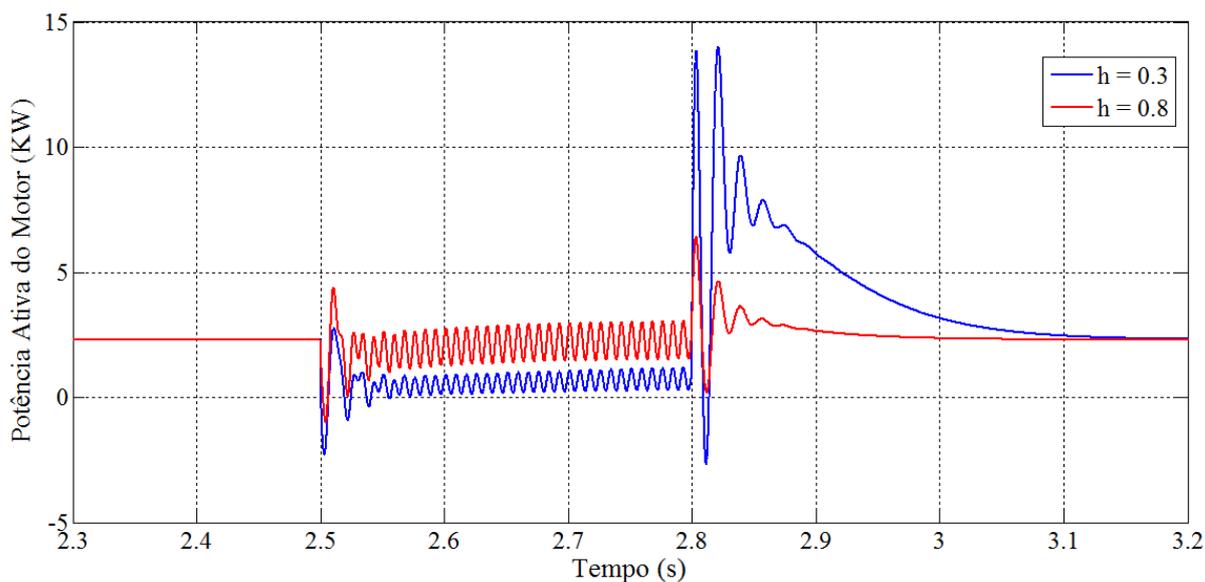


Figura 25 - Potência Ativa do motor de indução (KW) durante o afundamento de tensão tipo A

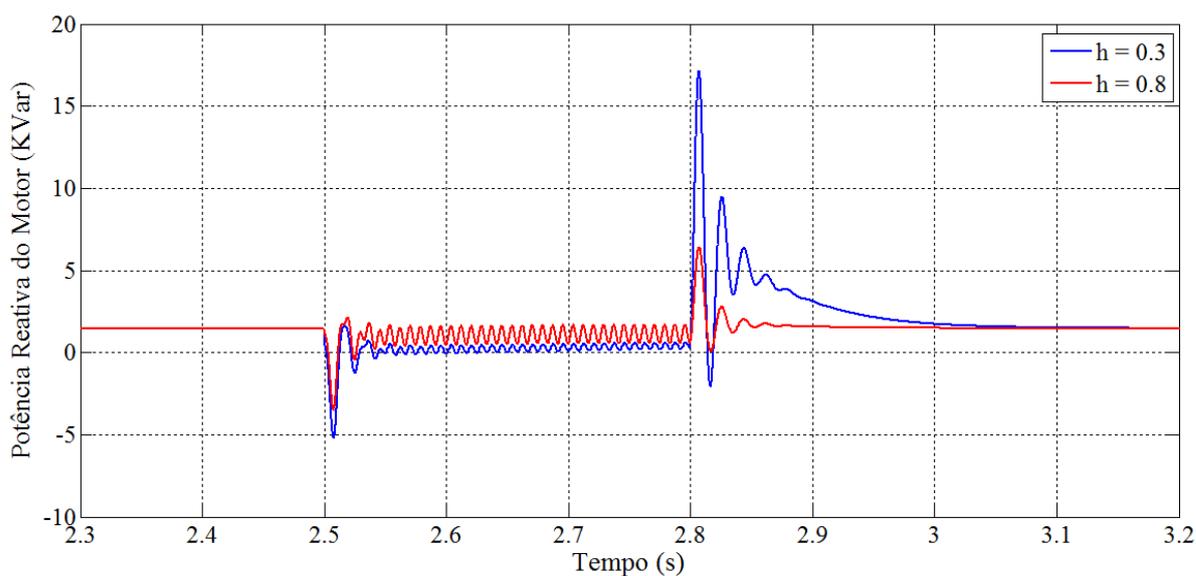


Figura 26 - Potência Reativa do motor de indução (KVar) durante um afundamento de tensão tipo A

Nota-se, claramente, que um menor valor da severidade do afundamento ( $h$ ), onde representa um decaimento maior com relação a tensão aplicada, resulta em variações com maiores intensidade e maior tempo de duração no transitório para o reestabelecimento das condições nominais.

No momento em que a tensão presente na figura 12 volta a condições nominais (a partir de 2,8 segundos), o motor entra em processo de reestabelecimento da condição em regime permanente. Este progresso representa em uma reaceleração do motor onde provoca picos de

corrente que são representados figura 24 para a fase A (o mesmo comportamento ocorre nas fases B e C, mas foram omitidos) [14]. A figura 22 mostra com clareza a diferença no tempo para o reestabelecimento da velocidade de rotação nominal com relação a severidade do afundamento de tensão. Um afundamento mais severo faz o motor perder mais velocidade e obviamente, demora mais tempo a retomar sua velocidade nominal de funcionamento após o desaparecimento do distúrbio.

### 3.1.2 Resultados a partir do afundamento de tensão tipo B

A mesma metodologia aplicada ao afundamento de tensão tipo A nos terminais do motor de indução é também colocada também para o tipo B de afundamento.

As variações ocorridas na magnitude do torque eletromecânico, velocidade de rotação, escorregamento, correntes do estator, potência ativa e reativa foram menos severas associadas em relação ao afundamento tipo A. Isto ocorre devido o afundamento de tensão tipo B ser resultado de faltas assimétricas no circuito do tipo fase-terra onde este curto-circuito provoca menos alterações no sistema se comparado a faltas simétricas. Apesar disso, as faltas simétricas ocorrem com muito menos frequência em sistemas de potência do que as assimétricas.

As figuras 27, 28 e 29 ilustram o torque eletromecânico, velocidade de rotação e escorregamento, respectivamente, do motor de indução durante o afundamento tipo B.

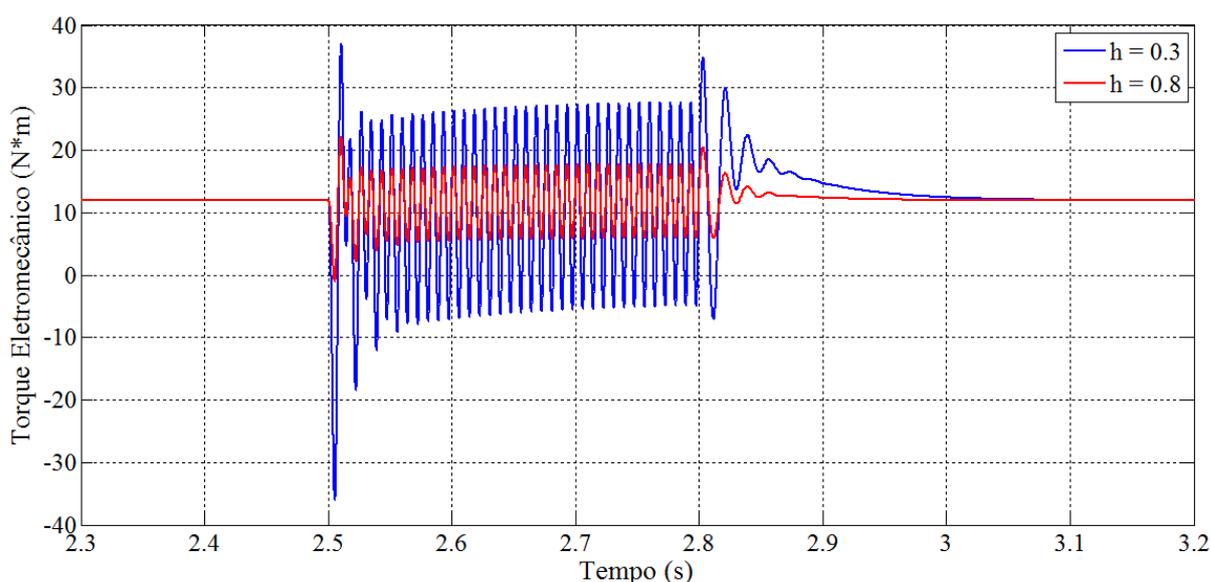


Figura 27 - Torque Eletromecânico (N\*m) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo B

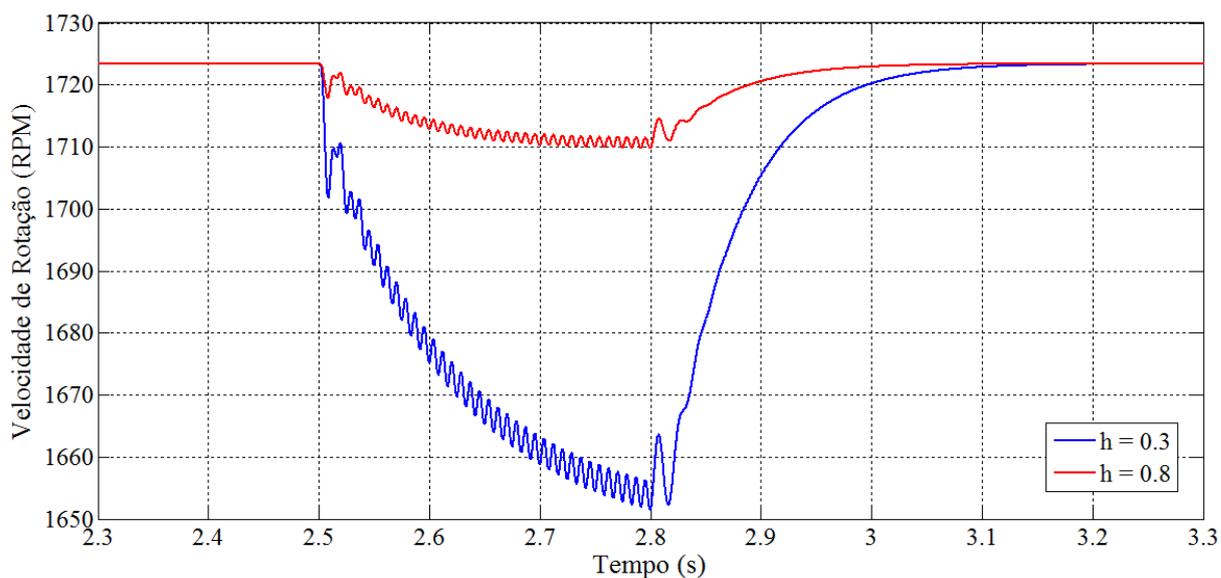


Figura 28 - Velocidade de Rotação (RPM) do eixo do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo B

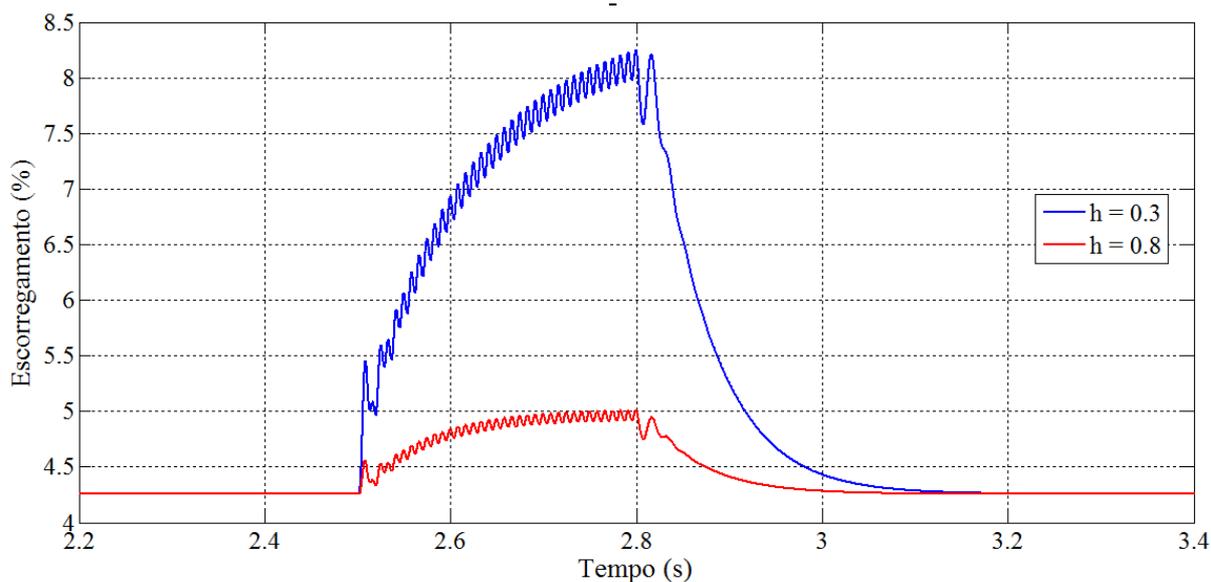


Figura 29 - Escorregamento (%) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo B

As figuras 30, 31 e 32 apresentam as correntes das fases A, B e C no estator da máquina. A potência ativa é mostrada na figura 33 e reativa na figura 34. Nota-se que as potências instantâneas ficam oscilando e não mais constante, devido ao desequilíbrio de tensão provocado pelo afundamento de tensão.

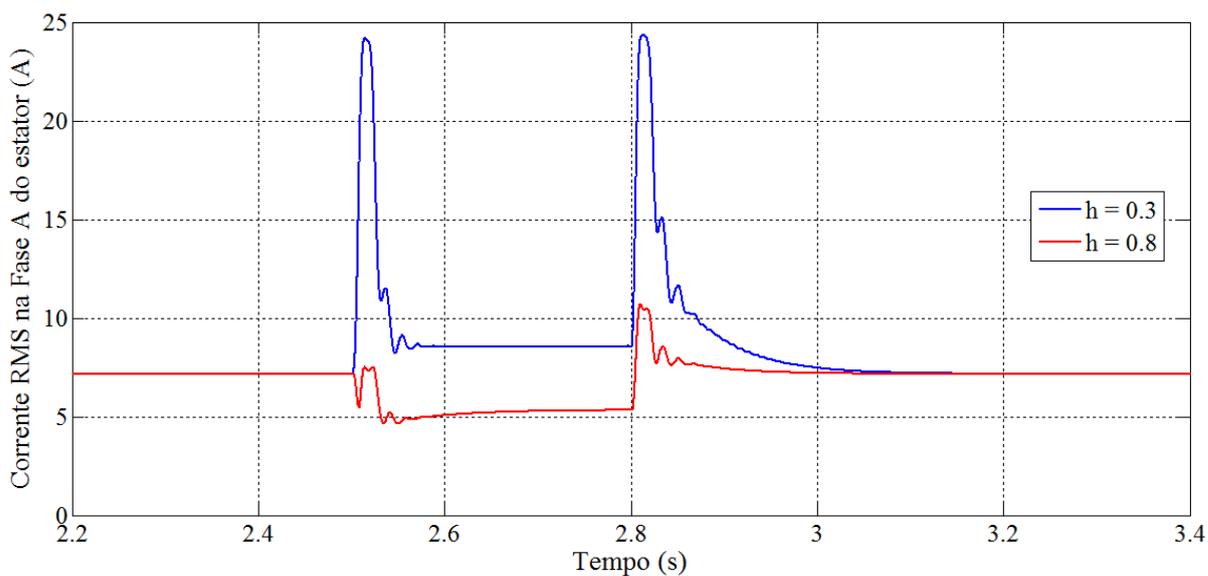


Figura 30 - Corrente RMS na Fase A do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo B

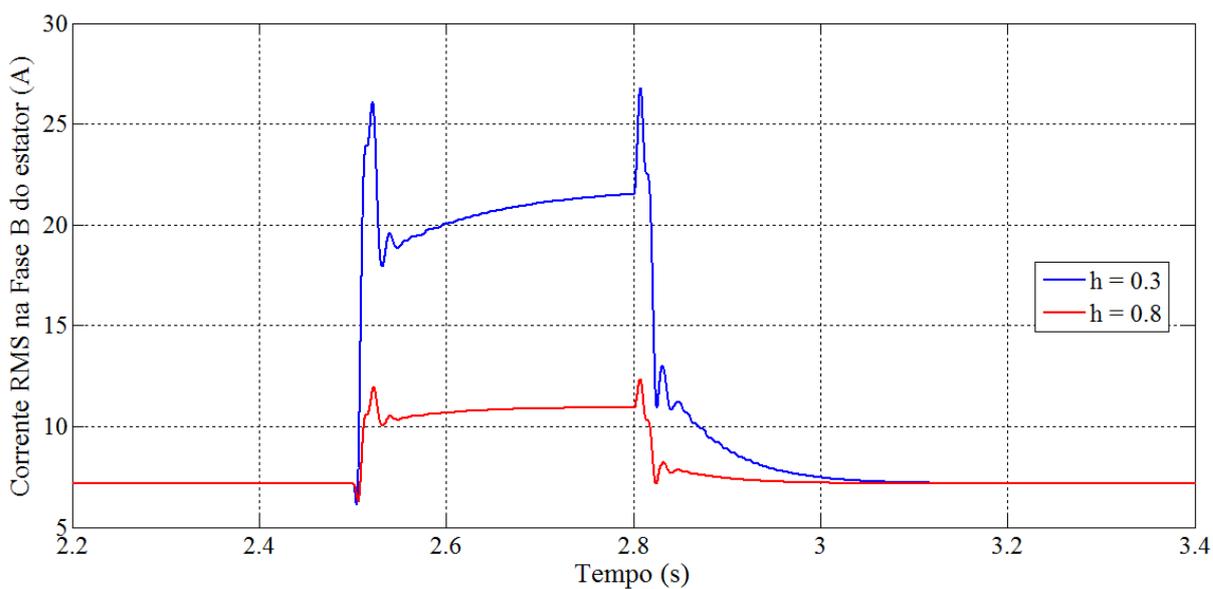


Figura 31 - Corrente RMS na Fase B do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo B

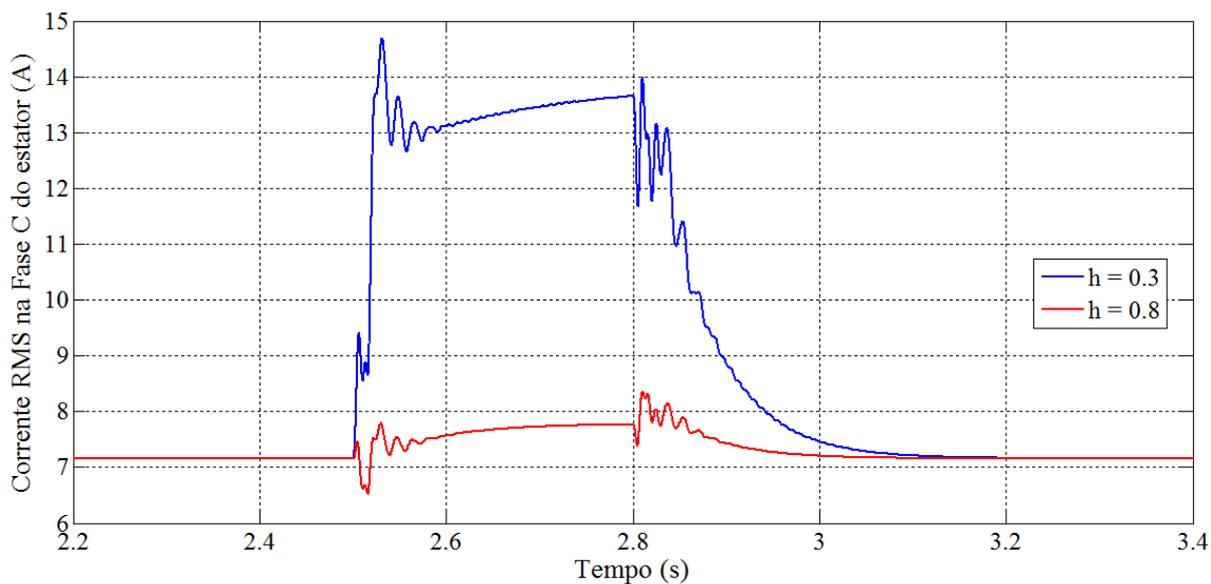


Figura 32 - Corrente RMS na Fase C do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo B

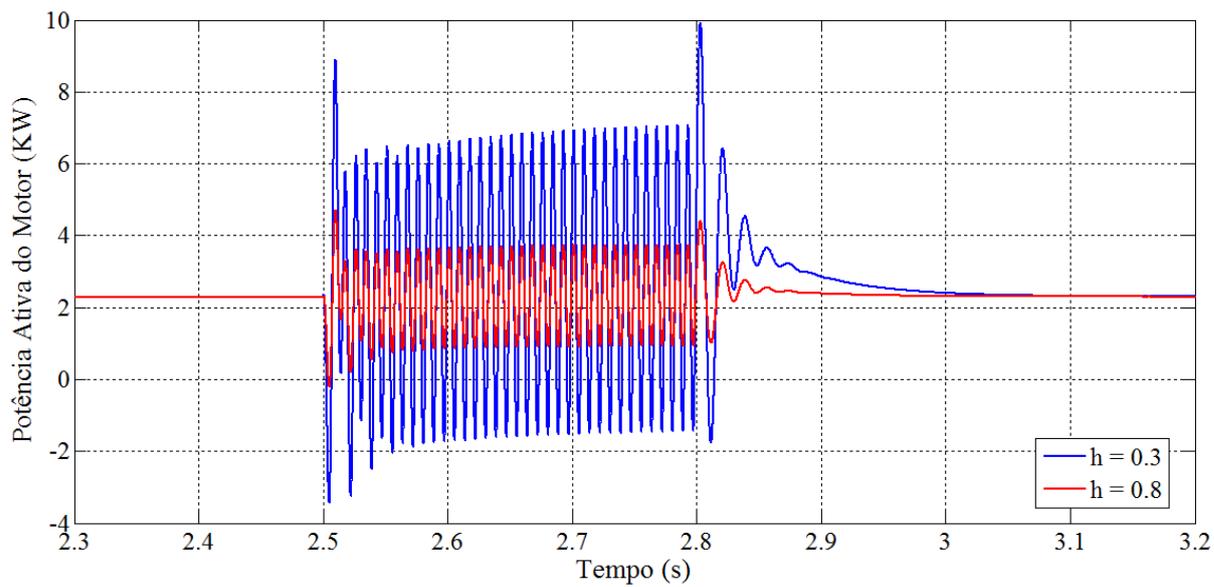


Figura 33 - Potência Ativa do motor de indução (KW) durante o afundamento de tensão tipo B

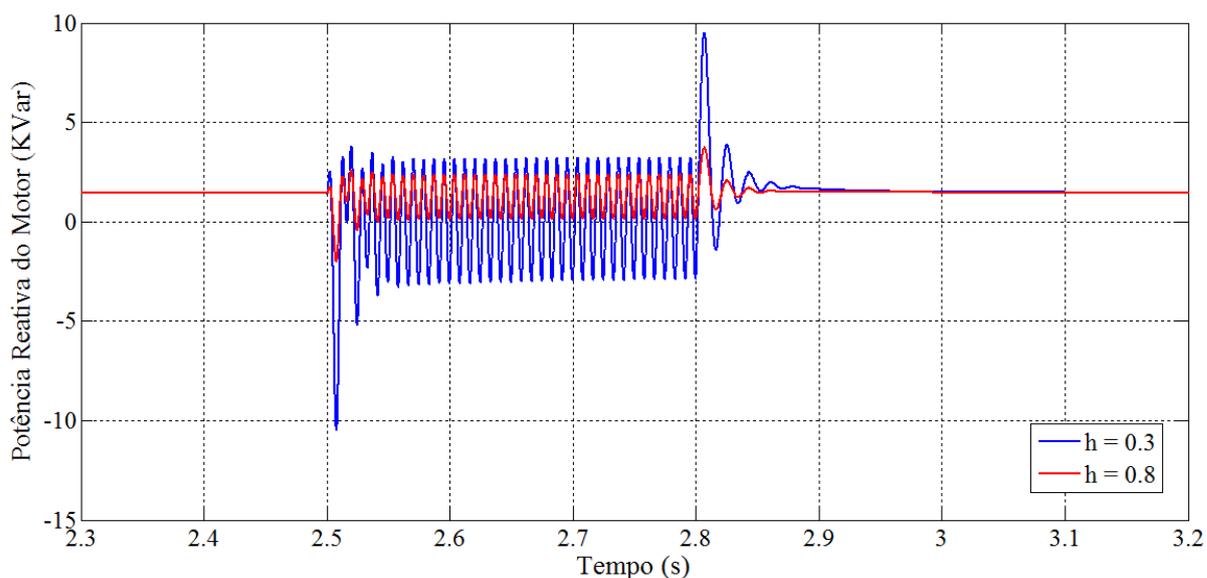


Figura 34 - Potência Reativa do motor de indução (KVar) durante o afundamento de tensão tipo B

O reestabelecimento a condições nominais de operação do motor para este evento, que ocorre após a 2,8 segundos, possui uma duração avaliada em sessenta mili-segundos a menos dos resultados associados ao afundamento tipo A. Nota-se também a influencia da severidade do afundamento onde um decaimento maior na tensão ( $h = 0,3$ ), provoca uma maior perturbação nos parâmetros do motor de indução afetando inclusive no tempo de reestabelecimento a operação em regime permanente do motor.

### 3.1.3 Resultados a partir do afundamento de tensão tipo C

O comportamento do motor de indução foi analisado de acordo com uma alimentação trifásica submetida a afundamento de tensão tipo C nas tensões fase-neutro. Os resultados são os parâmetros analisados nos afundamentos de tensão tipo A e B.

De forma similar aos afundamentos tipo A e B, os gráficos contendo os resultados de torque eletromecânico (Figura 35), velocidade de rotação do eixo da máquina (Figura 36), escorregamento (Figura 37), correntes estatóricas nas fases A, B e C (Figura 38, 39 e 40 respectivamente), potência ativa (Figura 40) e reativa (Figura 41) foram plotados durante um afundamento de tensão tipo C.

Nota-se, nestes resultados, que o fator severidade de afundamento possui uma grande influencia na variação das características do motor de indução. Tal parâmetro também relaciona

com o tempo de duração do reestabelecimento da máquina após o retorno dos níveis nominais de tensão que acontece antes do instante de 3,2 segundos.

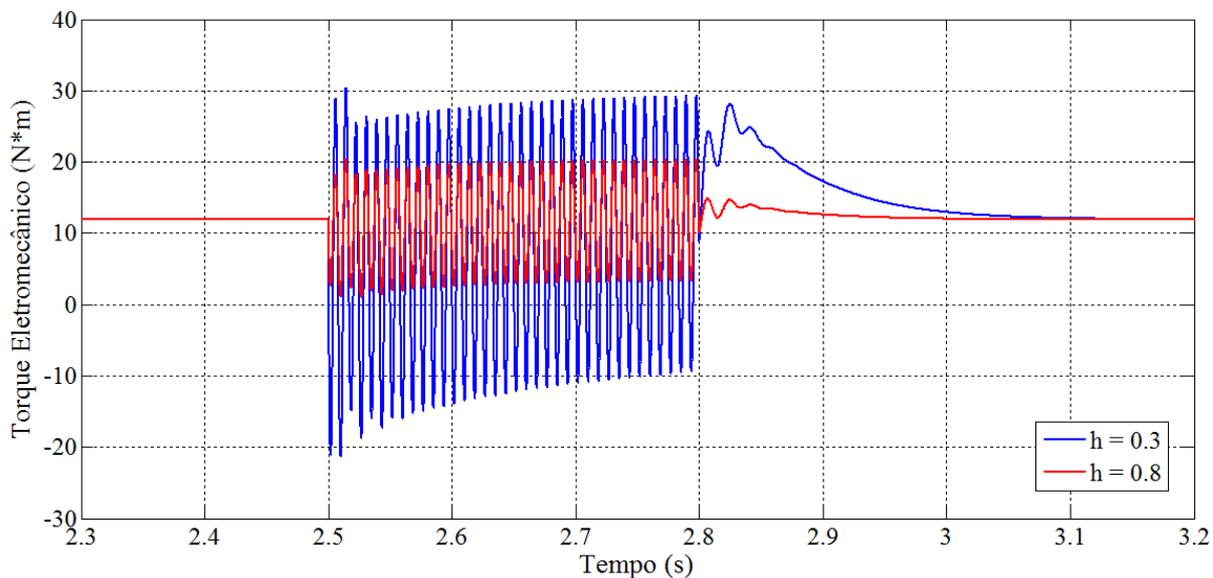


Figura 35 - Torque Eletromecânico (N\*m) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo C

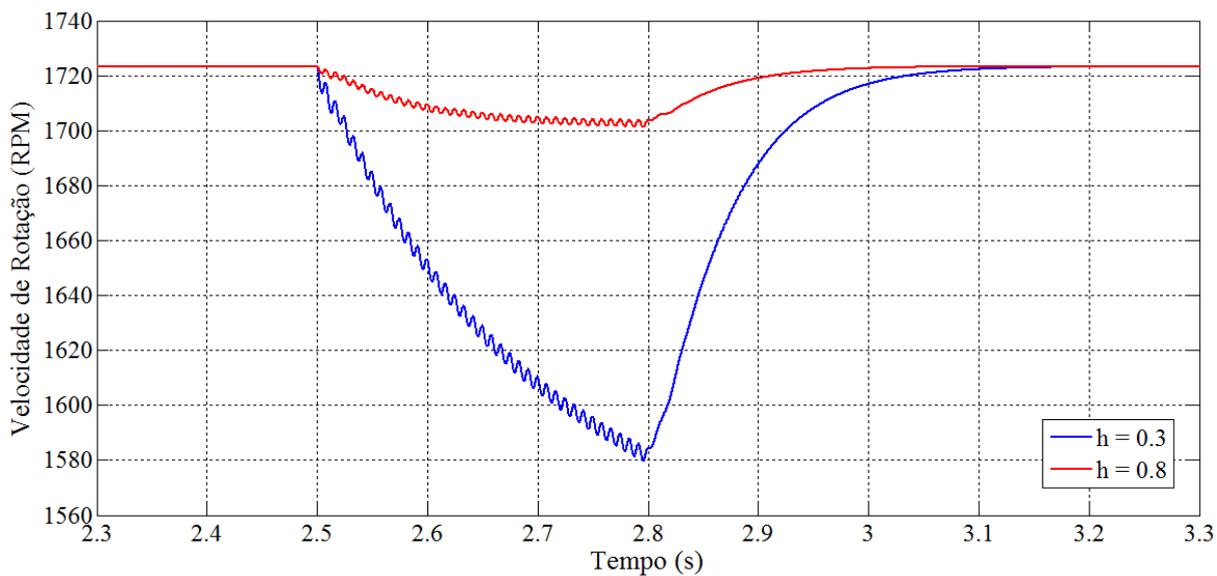


Figura 36 - Velocidade de Rotação (RPM) do eixo do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo C

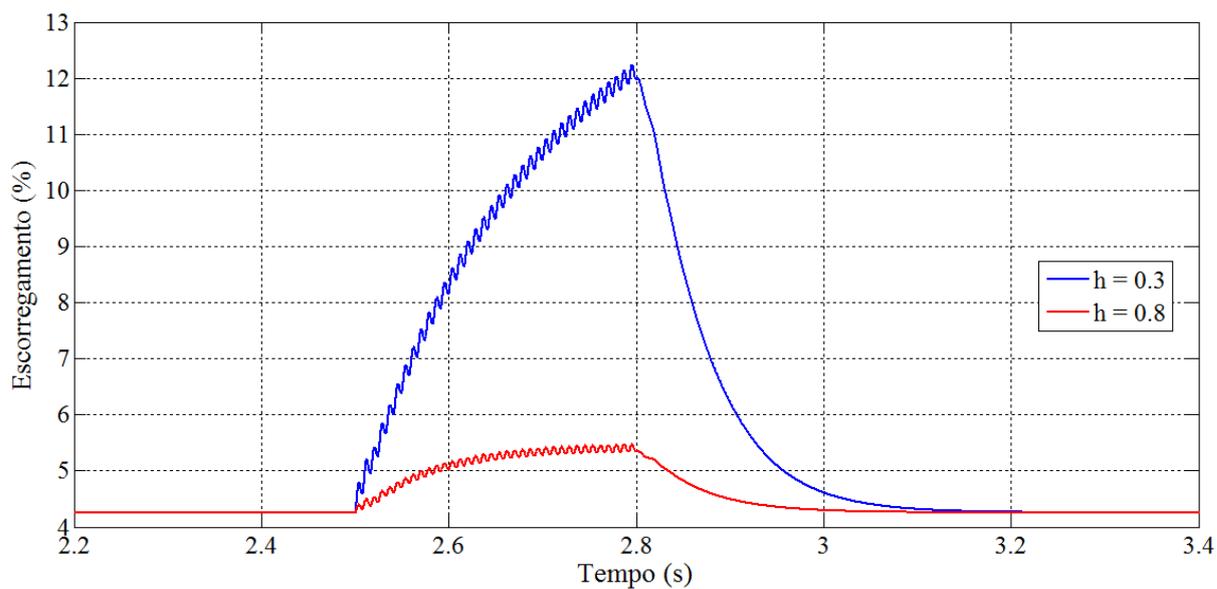


Figura 37 - Escorregamento (%) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo C

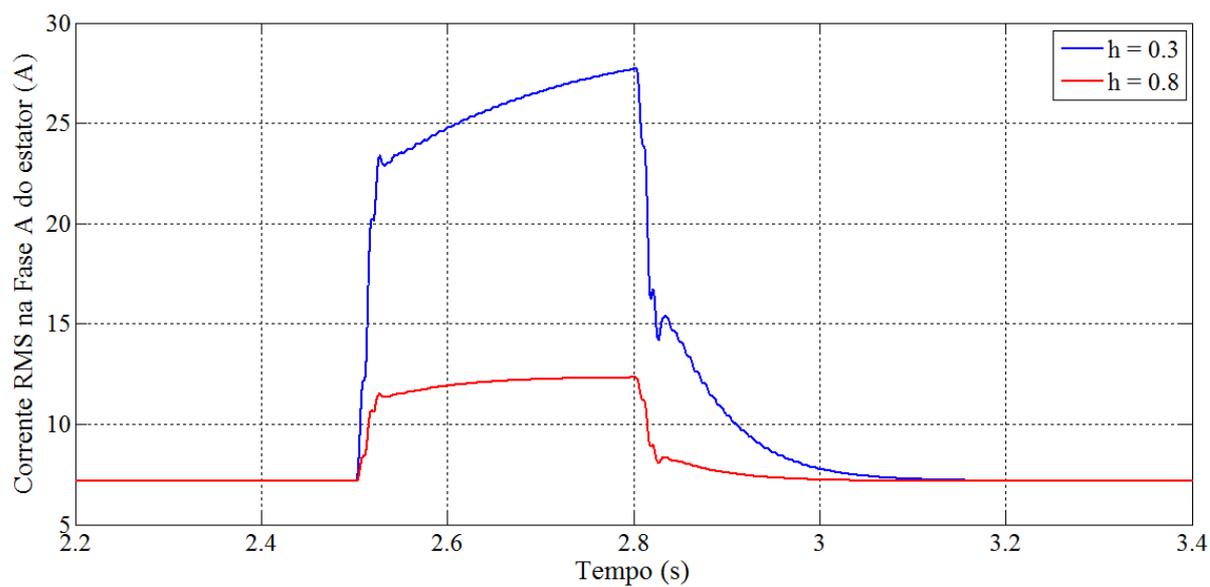


Figura 38 - Corrente RMS na fase A do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo C

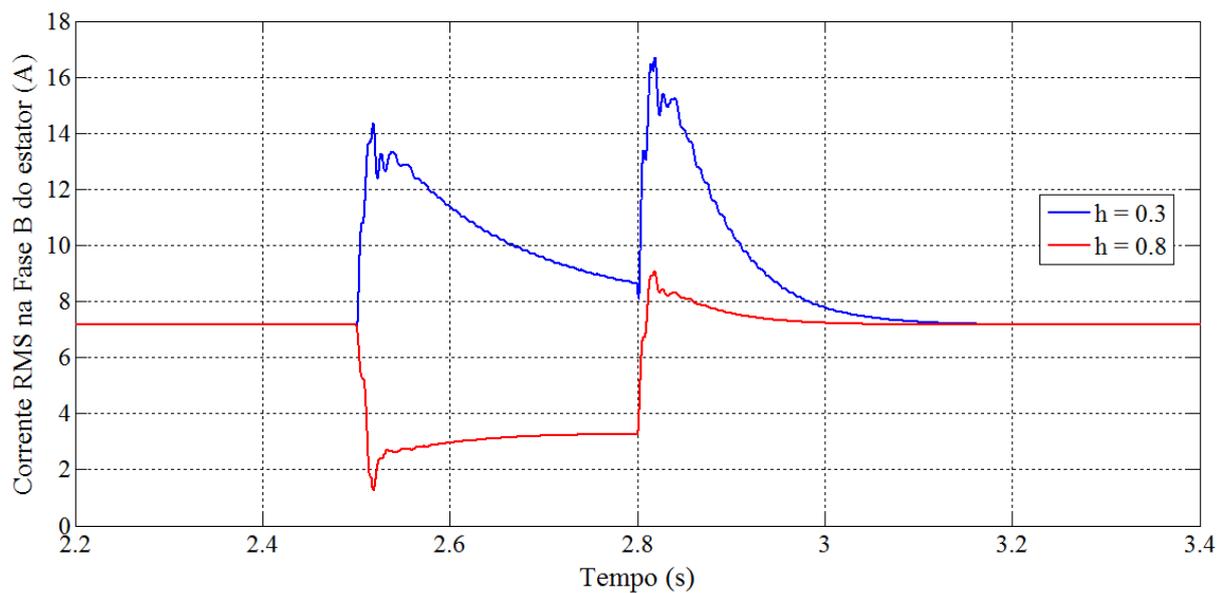


Figura 39 - Corrente RMS na fase B do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo C

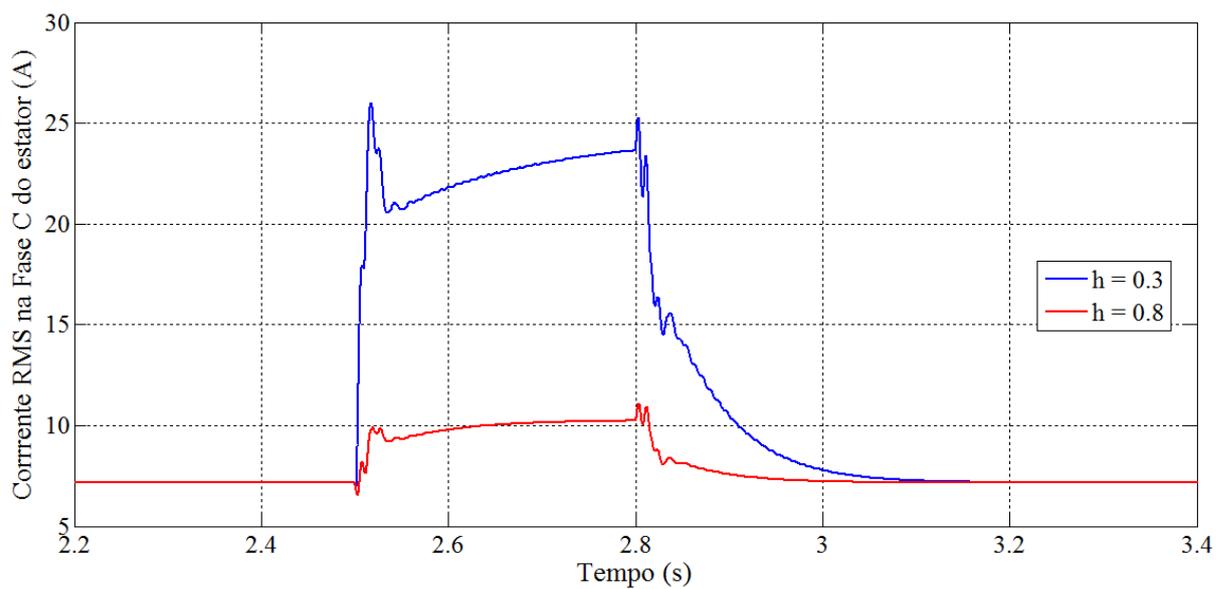


Figura 40 - Corrente RMS na fase C do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo C

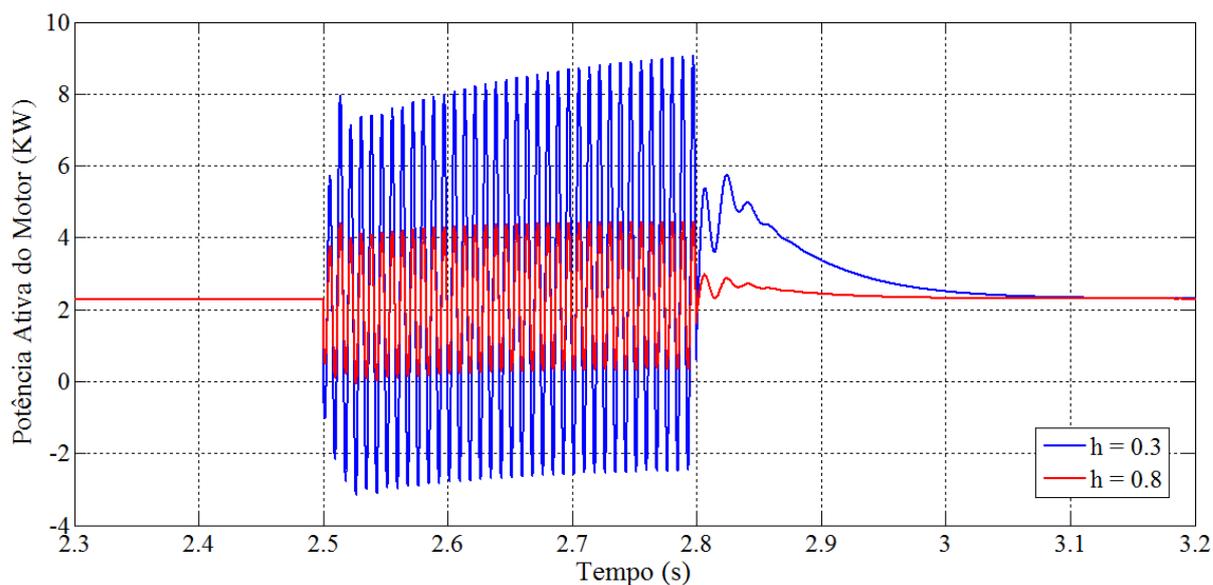


Figura 41 - Potência Ativa do motor de indução (KW) durante o afundamento de tensão tipo C

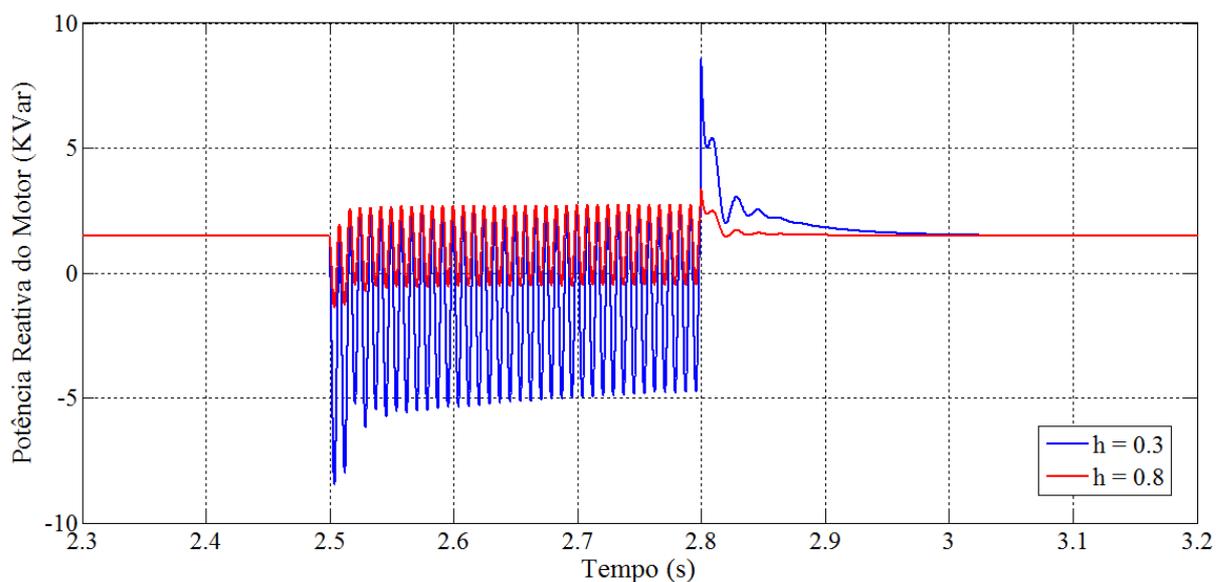


Figura 42 - Potência Reativa do motor de indução (KVar) durante o afundamento de tensão tipo C

### 3.1.4 Resultados a partir do afundamento de tensão tipo D

Por fim, os resultados das características do motor de indução submetido a afundamento de tensão tipo D são colocados nesta seção. Os gráficos correspondem as mesmas grandezas analisadas nos afundamentos tipo A, B e C.

O torque eletromecânico, a velocidade de rotação e o escorregamento são plotados nas figuras 43, 44 e 45, respectivamente. As correntes estatóricas nas fases A, B e C são colocadas nas figuras 46, 47 e 48. E a potência ativa e reativa nas figuras 49 e 50.

A severidade do afundamento novamente influencia sobre a variação da magnitude das características do motor em especial as correntes no estator da máquina. A duração do reestabelecimento a condições nominais de operação do motor é alcançado aproximadamente no instante de 3,14 segundos bastante similar ao afundamento de tensão tipo C. Tal similaridade se deve as causas comuns para estes afundamentos que são faltas assimétricas no sistema elétrico [1].

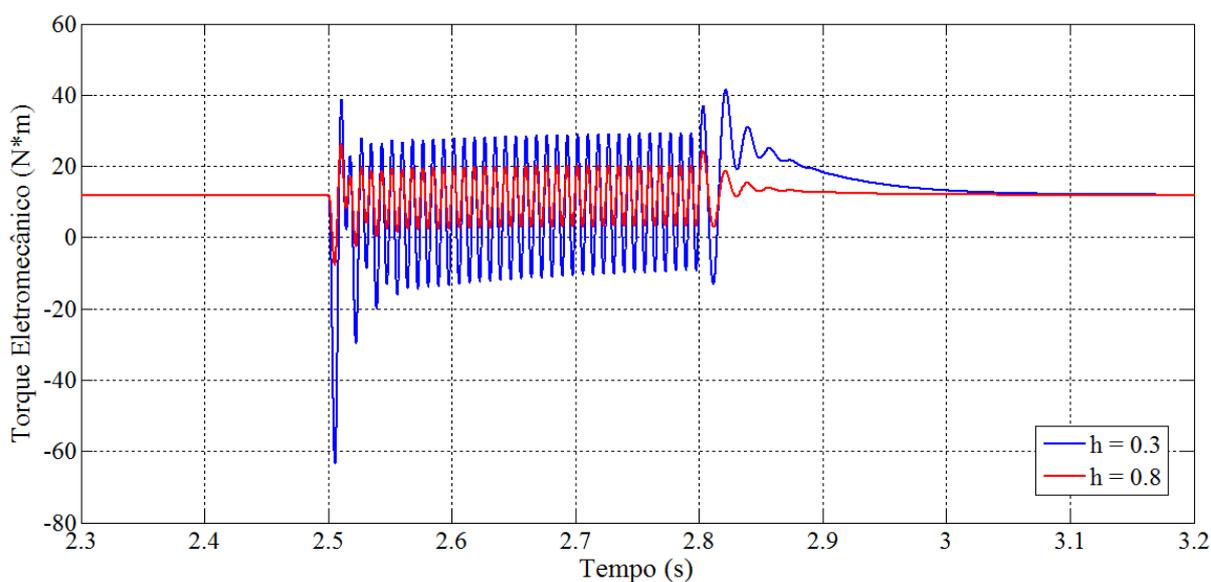


Figura 43 - Torque Eletromecânico (N\*m) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo D

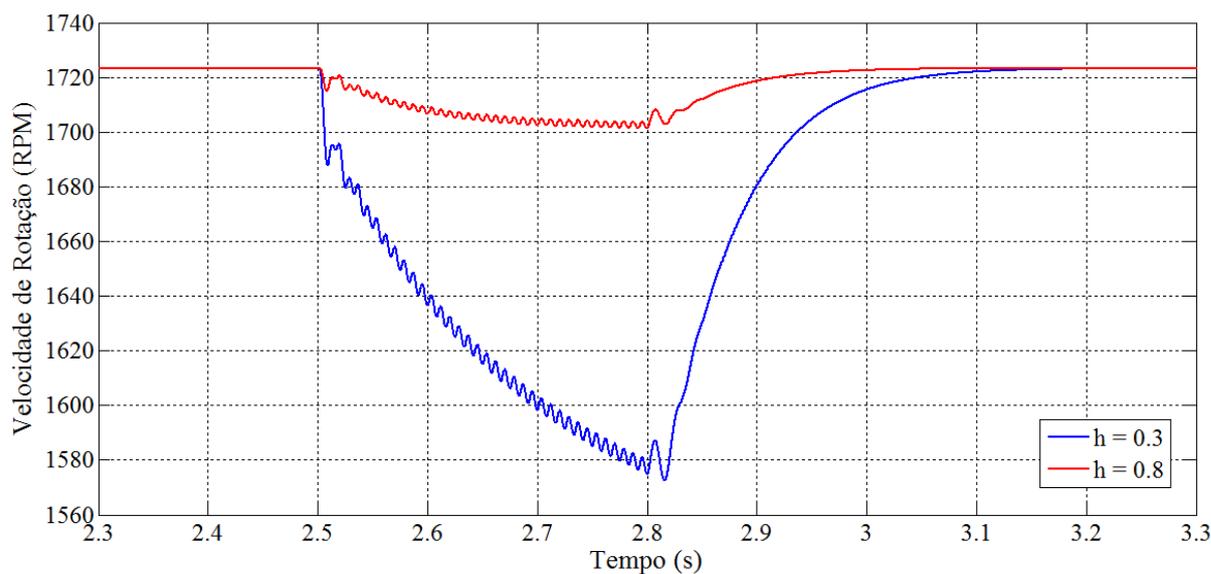


Figura 44 - Velocidade de Rotação (RPM) do eixo do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo D

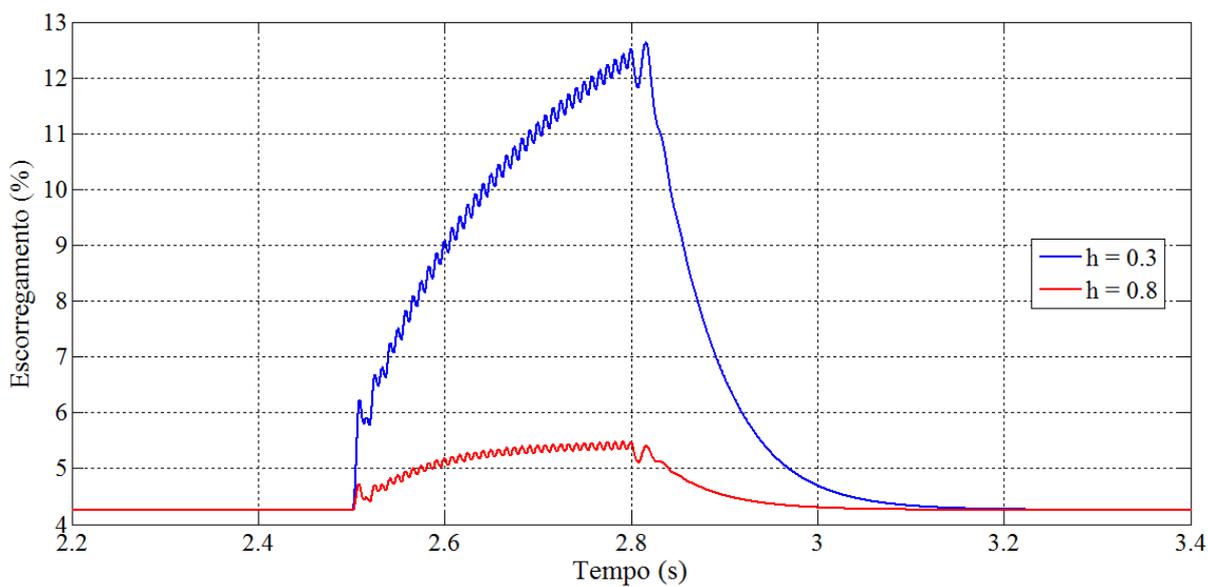


Figura 45 - Escorregamento (%) do motor de indução durante um afundamento de tensão tipo D

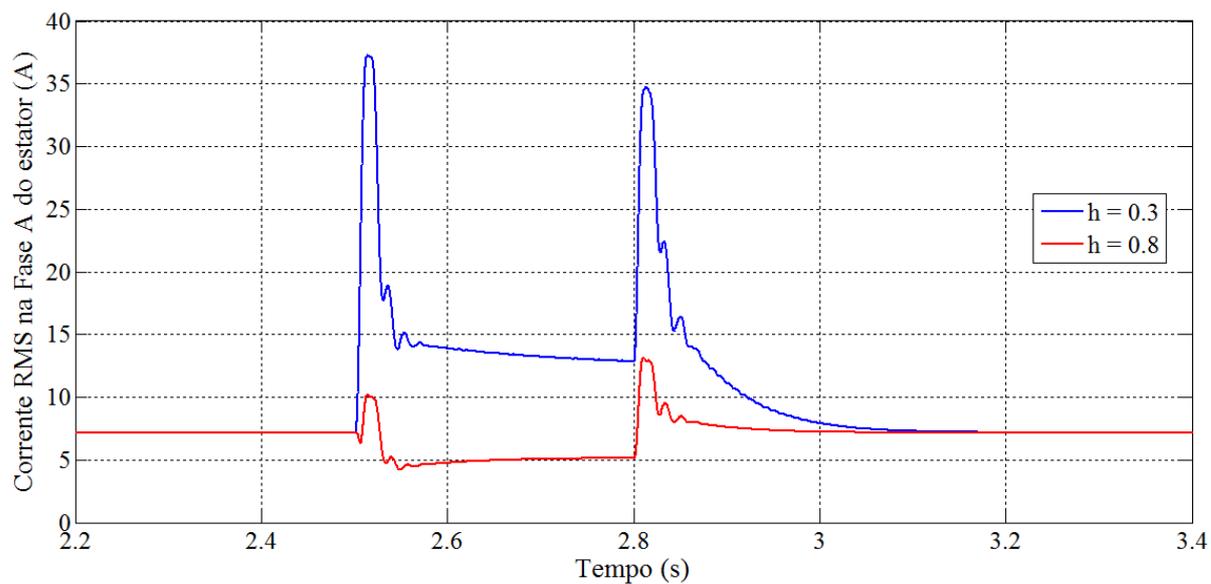


Figura 46 - Corrente RMS na fase A do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo D

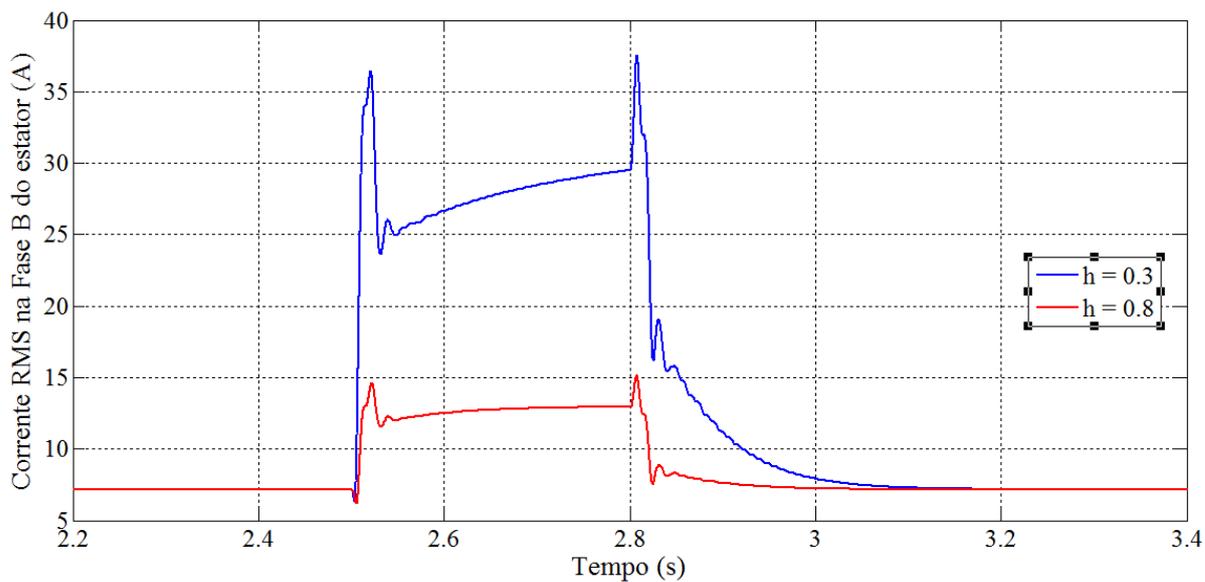


Figura 47 - Corrente RMS na fase B do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo D

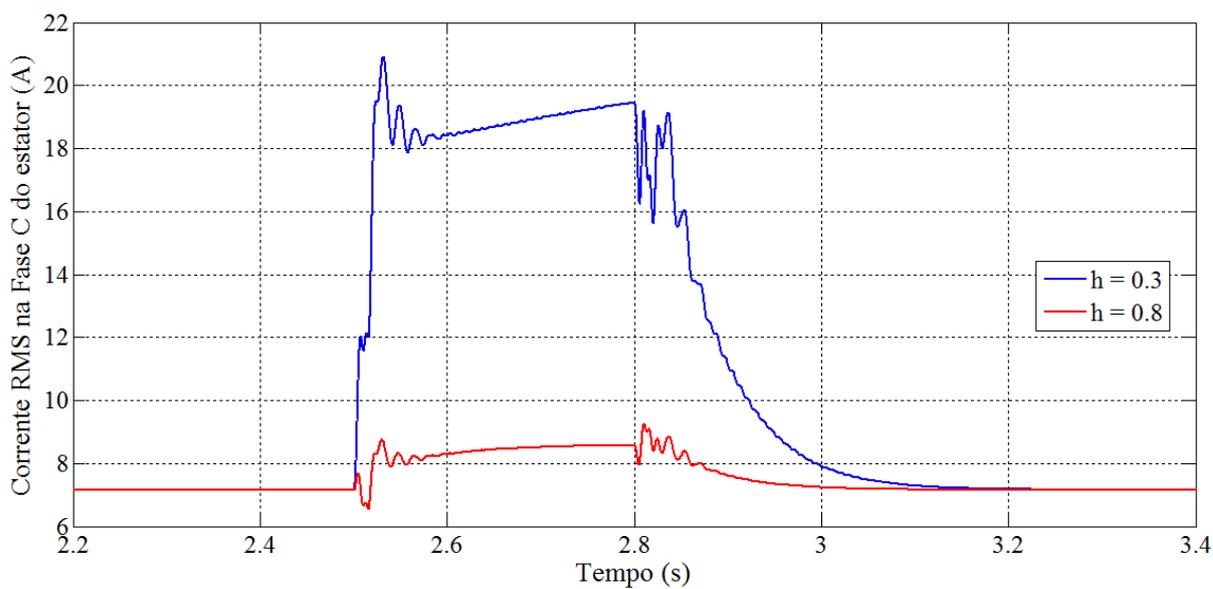


Figura 48 - Corrente RMS na fase C do estator (A) durante um afundamento de tensão tipo D

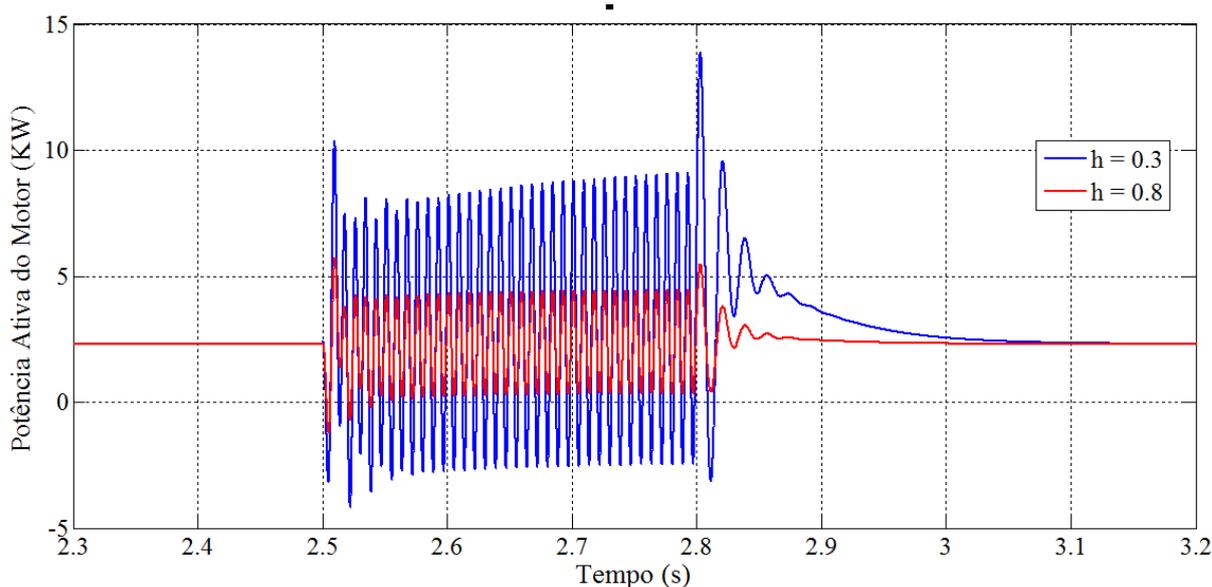


Figura 49 - Potência Ativa do motor de indução (KW) durante o afundamento de tensão tipo D

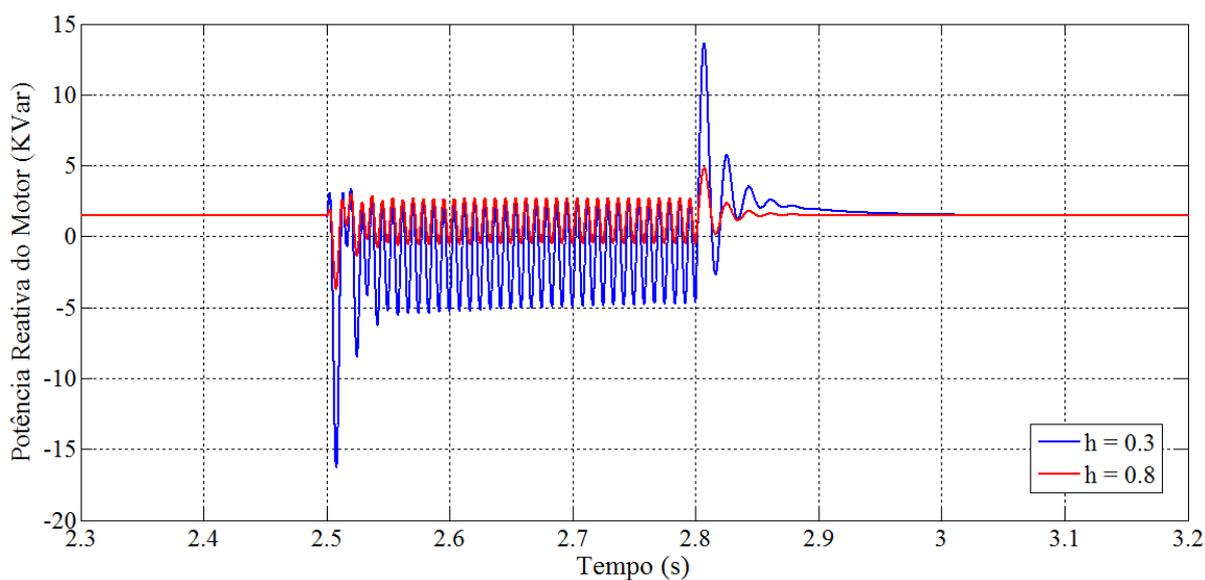


Figura 50 - Potência Reativa do motor de indução (KVar) durante o afundamento de tensão tipo D

### 3.2 Consequências das correntes estáticas

O comportamento do motor de indução trifásico demonstrou ser bastante oscilatório quando submetido a afundamentos de tensão. A tipo de A de afundamento produziu as maiores variações nos parâmetros discutidos na seção 3.1, nota-se, por exemplo, na velocidade de rotação, mostrada nas figuras Figura 22, Figura 28, Figura 36, Figura 44, que a maior redução ocorre em tal evento.

Os picos de corrente no estator ocorridos durante o reestabelecimento do motor a condições nominais, mostrados para a fase A (FigurasFigura 24, Figura 30, Figura 38, Figura 46), fase B (FigurasFigura 31, Figura 39, Figura 47) e fase C (FigurasFigura 32, Figura 40, Figura 48) são associados a elevação da temperatura no interior da máquina. Uma consequência desta relação é a redução da útil do motor quando tal carga é submetida a diversos afundamentos de tensão devido a uma rede de alimentação fraca.

Outra consequência relacionada aos picos de correntes no estator é a atuação indevida dos dispositivos de proteção. Fusíveis e disjuntores podem operar durante tal evento levando a um possível desligamento do motor e dos equipamentos relacionados a ele. Esta consequência é inteiramente ligada com a severidade do afundamento de tensão.

## 4 *Conclusões*

Este trabalho viabilizou o estudo dos afundamentos de tensão de curta duração durante a operação de uma carga indutiva através da simulação em ambiente computacional. A carga indutiva utilizada é o motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo onde os afundamentos de tensão tipo A, B, C e D foram aplicados.

Primeiramente, com a rede trifásica submetida a afundamento de tensão simulada, as análises a respeito da tensão fase-neutro da alimentação trifásica foram obtidas conforme os fundamentos teóricos deste trabalho. A maneira de estudo realizada determinou e demonstrou por meio das simulações a distinção entre as causas dos tipos de afundamentos de tensão, que foram verificadas nos resultados onde nota-se a relação entre o diagrama fasorial e as análises no tempo.

A variação do comportamento do motor de indução diante dos tipos de afundamentos de tensão estudados neste trabalho foram mais severas para afundamento tipo A devido a faltas simétricas no sistema elétrico, principal causa para o afundamento tipo A. Estes comportamentos relacionam com a magnitude dos parâmetros analisados e o tempo de reestabelecimento das condições nominais de operação da máquina. Mas, como já mencionado, este tipo de afundamento ocorre com menos frequência. Dessa forma, apesar de mais severo, o mesmo ocorre em aproximadamente 5% dos casos de falta em sistemas elétricos de potência.

A variação da corrente originadas dos afundamentos de tensão aplicados é um fator bem determinante em relação ao desempenho do motor. Os picos de corrente verificados durante o reestabelecimento da carga a valores nominais são as principais causas para a elevação de temperatura levando como consequência a redução da vida útil da máquina.

Outro fato observado é a influencia da severidade do afundamento de tensão diante do desempenho do motor de indução. Com um maior decaimento do nível RMS, ou seja, quanto maior a severidade do afundamento, maiores são as consequências que relacionam principalmente com a magnitude das corrente estatóricas durante tal evento.

Para trabalhos futuros relacionados ao comportamento do motor de indução durante uma operação anormal destaca-se a simulação de fonte trifásica de alimentação submetida a insterupção e elevação de tensão conectada diretamente ao motor com tempo de duração

diferente. Outra análise diz respeito a mitigação dos afundamentos de tensão que pode ser relacionados a sistema UPS (*Uninterruptible Power Supply*). Além disso, pode-se fazer análises com distúrbios ocorrentes ao mesmo tempo, como harmônicos e afundamentos de tensão. Outra análise futura, pode ser a implementação prática em laboratório, a partir do momento que for possível fazer tais ensaios com equipamentos adequados para realizar os afundamentos e também a aquisição de dados como o torque eletromagnético e outros.

## ***Referências Bibliográficas***

- [1] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems*, 1999.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso e H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2004.
- [3] A. Ghosh e G. Ledwich, *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, 2002.
- [4] Moreno-Muñoz, *Power Quality Mitigation Technologies in a Distributed Environment*, Springer, 2007.
- [5] D. J. Glover, S. S. Mulukutla e T. Overbye, *Power System Analysis and Design*, Global Engineering, 2008.
- [6] R. C. Leborgne, “Voltage Sags Characterisation and Estimation,” Chalmers University of Technology, Goteborg, 2005.
- [7] M. V. Guedes, “O Motor de Indução Trifásico,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1994.
- [8] O. S. Martins, “Comparação de Técnicas de Controle de Velocidade Sensorless aplicadas a Motores de Indução em plataforma DSP,” Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- [9] S. J. Chapman, *Fundamentos de Máquinas Elétricas*, 2013.
- [10] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley e D. S. Umans, *Máquinas Elétricas*, Artmed.
- [11] D. Llanos, J. Mora, J. Melendez, M. Ruiz, J. Colomer, J. Sanchez e X. Corbella, “Classification of Short Duration Faults (Voltage Sags) in Transmission and Distribution Power Systems”.
- [12] G. Olguin, “Voltage Dip (Sag) Estimation in Power Systems based on Stochastic Assessment and Optimal Monitoring,” Chalmers University of Technology, Goteborg, 2005.
- [13] C. T. d. A. N. Neto, “Análise de um Motor de Indução Trifásico submetido a Distorções Harmônicas na Fonte de Tensão,” Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- [14] M. H. J. Bollen, “The Influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags,” *IEEE Transaction on Industry Applications*, 1995.