

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Yuri Monteiro Collares

**ANÁLISE DE CICLOS DE OPERAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS NO EMTP-ATP**

Santa Maria, RS
2021

Yuri Monteiro Collares

**ANÁLISE DE CICLOS DE OPERAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS NO EMTP-ATP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista**.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando de Freitas Gutierrez

Santa Maria, RS
2021

Yuri Monteiro Collares

**ANÁLISE DE CICLOS DE OPERAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS NO EMTF-ATP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista**.

Aprovado em 02 de setembro de 2021;

Luiz Fernando de Freitas Gutierrez, Dr. (UFSM)
(Orientador)

Prof. Rodrigo Padilha, Dr. (UFSM)

Eng. Kaynan Maresch de Andrade (UFSM)

Santa Maria, RS
2021

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais Oswaldo e Vânia que sempre estiveram ao meu lado quando precisei me apoiando acreditando em mim fizeram de tudo para que eu seguisse estudando, ao amor da minha vida, minha parceira de vida Isabelle Monteiro, que me ajudou a tirar forças quando não tinha mais para que eu persistisse e finalizasse meu curso

“The world ain’t all sunshine and rainbows. It’s a very mean and nasty place, and I don’t care how tough you are, it will beat you to your knees and keep you there permanently if you let it. You, me, or nobody is gonna hit as hard as life. But it ain’t about how hard you hit. It’s about how hard you can get hit and keep moving forward; how much you can take and keep moving forward. That’s how winning is done!”

— Sylvester Stallone, *Rocky Balboa*

RESUMO

ANÁLISE DE CICLOS DE OPERAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS NO EMTP-ATP

AUTOR: Yuri Monteiro Collares

ORIENTADOR: Luiz Fernando de Freitas Gutierrez

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) utiliza o EMTP-ATP (*ElectroMagnetic Transients Program – Alternative Transients Program*) e o ATPDraw para analisar ciclos de operação (ou regimes de trabalho) de motores de indução trifásicos. Os regimes de trabalho representam a potência solicitada pela máquina elétrica em seu eixo em função do tempo, respeitando limites térmicos. Os ciclos de operação são padronizados pela ABNT NBR 17094-1:2018 e são fundamentais para especificar corretamente motores elétricos em relação às exigências mecânicas que deverão acionar, podendo ser cargas contínuas ou intermitentes, por exemplo. Inicialmente, necessitou-se modelar motores de indução trifásicos no EMTP-ATP e ATPDraw a partir de dados de fabricantes. Em seguida, a analogia entre sistemas mecânicos e elétricos foi empregada para representar o conjugado de carga, assim como o momento de inércia e o coeficiente de atrito característicos do problema. Por meio de ajustes nesse equivalente elétrico-mecânico foi possível modelar os regimes de trabalho S1 (contínuo), S2 (tempo limitado) e S3 (intermitente periódico). Os procedimentos adotados são descritos com detalhes e viabilizam investigações avançadas de motores de indução trifásicos no EMTP-ATP e ATPDraw

Palavras-chave: Motor de indução. EMTP-ATP. Ciclos de operação.

ABSTRACT

ANALYSIS OF OPERATING CYCLES OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS ON EMTP-ATP

AUTHOR: Yuri Monteiro Collares
ADVISOR: Luiz Fernando de Freitas Gutierrez

This Course Completion Paper (TCC) uses the EMTP-ATP (ElectroMagnetic Transients Program) and the ATPDraw to analyze operating cycles (or duty regimes) of three-phase induction motors. The work regimes represent the power requested by the electric machine on its axis as a function of time, respecting thermal limits. The operating cycles are standardized by ABNT NBR 17094-1:2018 and are essential to correctly specify electric motors in relation to the mechanical requirements that must be activated, which can be continuous or intermittent loads, for example. Initially, it was necessary to model three-phase induction motors in EMTP-ATP and ATPDraw from manufacturers' data. Then, the analogy between mechanical and electrical systems was used to represent the charge torque, as well as the moment of inertia and friction coefficient characteristic of the problem. Through adjustments in this electrical-mechanical equivalent, it was possible to model the work regimes S1 (continuous), S2 (limited time) and S3 (intermittent periodic). The procedures adopted are described in detail and enable advanced investigations of three-phase induction motors in EMTP-ATP and ATPDraw.

Keywords: Induction motor. EMTP-ATP. Operating Cycle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Partes e componentes do motor de indução.....	18
Figura 2 – Tipos de Rotores de Motores de indução.....	19
Figura 3 – Circuito equivalente por fase de um motor de indução.....	20
Figura 4 – Fluxo das Potências Motor de Indução.....	20
Figura 5 – Curva Conjugado versus Velocidade.....	21
Figura 6 – Diagrama ligação ensaio a vazio.....	22
Figura 7 – Fluxo da potência ensaio a vazio.....	23
Figura 8 – Diagrama ligação ensaio rotor bloqueado.....	23
Figura 9 – Fluxo da potência ensaio rotor bloqueado.....	24
Figura 10 – Ciclo de operação S1.....	29
Figura 11 – Ciclo de operação S2.....	31
Figura 12 – Ciclo de operação S3.....	32
Figura 13 – Ciclo de operação S4.....	33
Figura 14 – Ciclo de operação S5.....	34
Figura 15 – Ciclo de operação S6.....	35
Figura 16 – Ciclo de operação S7.....	35
Figura 17 – Ciclo de operação S8.....	36
Figura 18 – Ciclo de operação S9.....	36
Figura 19 – Ciclo de operação S10.....	38
Figura 20 – Tela inicial ATPDraw.....	39
Figura 21 – Bloco “UMIND”	40
Figura 22 – Bloco “UM Type 3”	41
Figura 23 – Circuito equivalente dos parâmetros mecânicos.....	41
Figura 24 – Detalhes fonte de tensão de entrada.....	43
Figura 25 – Circuito modelado para simulação de ensaios.....	44
Figura 26 – Detalhes do motor simulado	45
Figura 27 – Parâmetros internos do motor	45
Figura 28 – Parâmetros da simulação dos ensaios	46
Figura 29 – Tensão do estator a vazio	47
Figura 30 – Corrente do estator a vazio	47
Figura 31 – Potência do estator a vazio.....	48
Figura 32 – Parâmetros fonte de tensão equivalente a velocidade angular.....	49
Figura 33 – Tensão no estator com rotor bloqueado.....	50
Figura 34 – Corrente no estator com rotor bloqueado.....	50

Figura 35 – Potência no estator com rotor bloqueado.....	51
Figura 36 – Tensão no estator a plena carga.....	52
Figura 37 – Corrente no estator a plena carga.....	52
Figura 38 – Potência no estator a plena carga.....	53
Figura 39 – Circuito construído ciclo S1.....	54
Figura 40 – Parâmetros de simulação no ATPDraw	54
Figura 41 – Parâmetros fonte de corrente, equivalente a carga	55
Figura 42 – Velocidade angular no ciclo S1	55
Figura 43 – Torque no ciclo S1	56
Figura 44 – Tensão no ciclo S1	56
Figura 45 – Potência no ciclo S1	57
Figura 46 – Corrente no ciclo S1	58
Figura 47 – Parâmetros de simulação no ATPDraw	59
Figura 48 – Parâmetros fonte de corrente equivalente a carga	59
Figura 49 – Velocidade angular do ciclo S2	60
Figura 50 – Torque do ciclo S2	60
Figura 51 – Tensão do estator do ciclo S2	61
Figura 52 – Potência do estator do ciclo S2	61
Figura 53 – Corrente do estator do ciclo S2	62
Figura 54 – Circuito de simulação do ciclo S3	63
Figura 55 – Parâmetros de simulação ciclo S3.....	63
Figura 56 – Velocidade angular do ciclo S3.....	64
Figura 57 – Torque do ciclo S3	64
Figura 58 – Tensão do ciclo S3	65
Figura 59 – Potência do ciclo S3	65
Figura 60 – Corrente do ciclo S3	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Temperatura máxima dos enrolamentos por classe.....	26
Quadro 2 – Classe de isolamento térmico.....	27
Quadro 4 – Analogia entre parâmetros mecânicos e elétricos.....	40
Quadro 5 – Dados tabelados do motor de indução.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de serviço.....	30
------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
RPM	Rotações por minuto
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
n_s	Velocidade síncrona [rpm]
pu	por-unidade
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
P	Número de polos do motor
EMTP	<i>Eletromagnetic Transients Program</i>
C	Capacitância
t	Tempo
G	Condutância
HP	<i>Horsepower</i>
I_p	Corrente de partida
J	Momento de inércia
T_c	Conjugado da carga
D	Coefficiente de atrito
ω	Velocidade angular na frequência síncrona
ω_r	Velocidade angular do roto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Geral.....	16
1.1.2	Específicos	16
2	METODOLOGIA DA PESQUISA	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	18
3.2	ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO	21
3.2.1	Importância dos ensaios	21
3.2.2	Ensaio a vazio	22
3.2.3	Ensaio de rotor bloqueado.....	23
3.3	Análise térmica de um motor de indução	24
3.3.1	Classes de isolamento térmico.....	25
3.3.2	Aferição da temperatura dos enrolamentos	26
3.4	Ciclos de operação	28
3.4.1	Regime Contínuo (S1)	28
3.4.2	Regime de tempo limitado (S2)	31
3.4.3	Regime intermitente periódico (S3)	32
3.4.4	Regime intermitente periódico tipo (S4).....	33
3.4.5	Outros Regimes.....	34
4	Modelagem e simulação	39
4.1	O EMTP-ATP e o ATPDraw	39
4.2	Modelagem de motores de indução trifásicos no EMTP-ATP e no ATPDraw	39
4.2.1	Modelagem do circuito no ATPDraw	42
4.3	Simulações dos ensaios	45
4.3.1	Ensaio a vazio	46
4.3.2	Ensaio de rotor bloqueado.....	48
4.3.3	Ensaio a plena carga	51
4.4	Simulação dos ciclos de operações	53
4.4.1	Ciclo de operação S1	53
4.4.2	Ciclo de operação S2	58
4.4.3	Ciclo de operação S3	62

5	Conclusão.....	67
6	BIBLIOGRAFIA	68

1 INTRODUÇÃO

Motores elétricos desempenham um papel importante nas atividades industriais, assim como em unidades consumidoras dos tipos comercial e residencial. As suas aplicações diversificadas vão desde o uso em eletrodomésticos como em máquinas de lavar, furadeiras, liquidificadores, ventiladores, entre outros; até a operação em processos industriais como em bombas, compressores, centrífugas, ventiladores, etc.

Os motores de indução trifásicos são máquinas elétricas assíncronas e são amplamente utilizados na indústria em razão de sua robustez e custos baixos. O dimensionamento adequado de um motor de indução trifásico em respeito à exigência de carga (potência mecânica) esperada é fundamental para garantir um regime de trabalho energeticamente eficiente e uma prolongada vida útil da máquina. Para tanto, dois aspectos de análise são destacados para a especificação de motores de indução trifásicos:

- a) O conjugado eletromagnético deve ser suficiente para suprir solicitações mecânicas e uma determinada velocidade rotacional.
- b) O funcionamento da máquina deve respeitar critérios térmicos, ou seja, a temperatura do enrolamento estatórico não pode ultrapassar a temperatura máxima admissível

Este Trabalho de Conclusão de Curso busca modelar regimes de trabalho de motores de indução trifásicos no EMTP-ATP (*ElectroMagnetic Transients Program – Alternative Transients Program*) e o ATPDraw, fazendo a análise dos ciclos de operação (ou regimes de trabalho) de motores de indução trifásico, estes ciclos são padronizados pela ABNT NBR 17094-1:2018. Neste trabalho será apresentado as análises e simulações dos regimes de trabalho S1 (contínuo), S2 (tempo limitado) e S3 (intermitente periódico). Na próxima subseção são apresentados os objetivos desta pesquisa

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

O objetivo principal deste trabalho é analisar ciclos de operação de motores de indução trifásicos no EMTP-ATP (*ElectroMagnetic Transients Program – Alternative Transients Program*) e o ATPDraw.

1.1.2 Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho de pesquisa científica são:

- Compreender os princípios de funcionamento de motores de indução.
- Modelar motores de indução trifásicos no EMTP-ATP e no ATPDraw.
- Executar simulações computacionais para analisar motores elétricos em diferentes condições operacionais.
- Comparar os resultados das simulações no EMTP-ATP e no ATPDraw com valores típicos de características externas obtidos com fabricantes.

2 METODOLOGIA DA PESQUISA

As linhas de pesquisa escolhidas para este projeto de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) são as seguintes:

1. Estudo teórico sobre motores de indução trifásicos (linha de pesquisa 1): Para o desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso foi realizado inicialmente um estudo teórico sobre os motores de indução trifásico. Para um melhor entendimento da sua construção, funcionamento e utilidades, foram realizadas leituras em livros.
2. Estudo teórico sobre os ciclos de operação de motores elétricos (linha de pesquisa 2): Após o entendimento teórico do motor de indução trifásico passa-se para o estudo dos ciclos de operações desses motores. Nesta linha de pesquisa foram utilizados materiais disponibilizados pelo Prof. Orientador, bem como a pesquisa em artigos sobre o assunto.
3. Modelagem de motores de indução trifásicos no EMTP-ATP e no ATPDraw (linha de pesquisa 3): Nessa linha de pesquisa, foram utilizados guias, manuais, e sites de grupos de pesquisas que desenvolvem simulações no EMTP-ATP assim obtendo o conhecimento necessário para a realização da simulação de forma satisfatória.

Após a execução das atividades previstas em cada uma das linhas de pesquisa, viabiliza-se a realização de estudos avançados com motores de indução trifásicos no EMTP-ATP e ATPDraw.

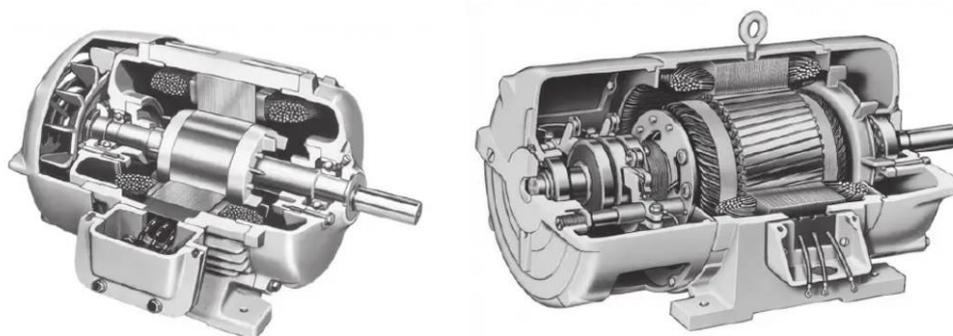
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Os motores de indução trifásico têm seu funcionamento baseado na ideia indução eletromagnética, dispensando a necessidade de um sistema de excitação magnética independente para seu funcionamento. Mesmo que essas máquinas elétricas possam funcionar como geradores, são geralmente empregadas como motores.

Como ilustra a Figura 1, o motor de indução é construído com um estator semelhante ao de uma máquina síncrona.

Figura 1 – Partes e componentes do motor de indução.



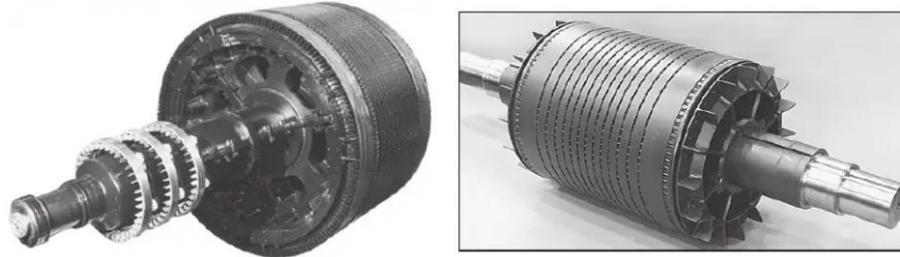
Esquerda: Motor com rotor gaiola de esquilo; Direita: Motor com rotor bobinado.

Fonte: Chapman (2013).

Como pode-se visualizar na Figura 1 existe a representação de dois rotores, o motor do tipo gaiola de esquilo consiste em uma série de barras condutoras que estão encaixadas dentro de ranhuras na superfície do rotor e postas em curto-circuito em ambas as extremidades por grandes anéis de curto-circuito.

Os rotores bobinados têm seu conjunto completo de enrolamentos trifásicos similar ao do estator, com as fases do enrolamento colocadas em curto-circuito por meio de escovas que se apoiam nos anéis deslizantes, estes anéis são os responsáveis pela conexão dos três terminais do rotor, a diferença na construção deles pode ser observada na figura 2 representado o rotor gaiola de esquilo a direita e o rotor bobinado a esquerda.

Figura 2 – Tipos de rotores de motores de indução



Esquerda: Rotor bobinado; Direita: Rotor gaiola de esquilo.

Fonte: Chapman (2013).

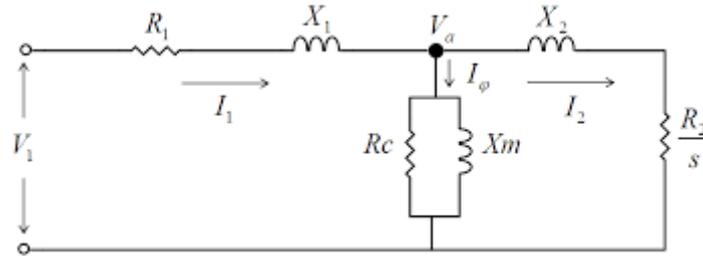
Devido ao campo girante do estator, a tensão induzida nas barras de um rotor de indução depende da velocidade do rotor em relação à diferença entre os campos magnéticos do rotor e do estator. Esta velocidade é conhecida como velocidade de escorregamento. O escorregamento é a velocidade relativa expressa em uma base de porcentagem, sendo calculado a partir da Equação 1.

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (\times 100\%) \quad (1)$$

Em que s é o escorregamento, n_{sinc} é a velocidade síncrona da rede elétrica e n_m é a velocidade mecânica do eixo da máquina.

O circuito equivalente de um motor de indução é baseado na indução eletromagnética feita pelo sistema do estator no sistema do rotor. Nesse sentido o circuito equivalente de um motor de indução é muito semelhante ao de um transformador, com dependência do escorregamento como é ilustrado na Figura 3. Nessa figura, respectivamente, R_1 e X_1 , são a resistência e reatância de dispersão do lado do estator; R_c e X_m são a resistência e a reatância do ramo de magnetização; e X_2 e R_2 são a resistência e a reatância de dispersão do lado do rotor.

Figura 3 – Circuito equivalente por fase de um motor de indução.



Fonte: Chapman (2013).

A Figura 4 demonstra as perdas que existem durante a operação de um motor elétrico. A potência de entrada é dada pela equação apresentada na entrada do fluxo de potência na Figura 4 e dada por:

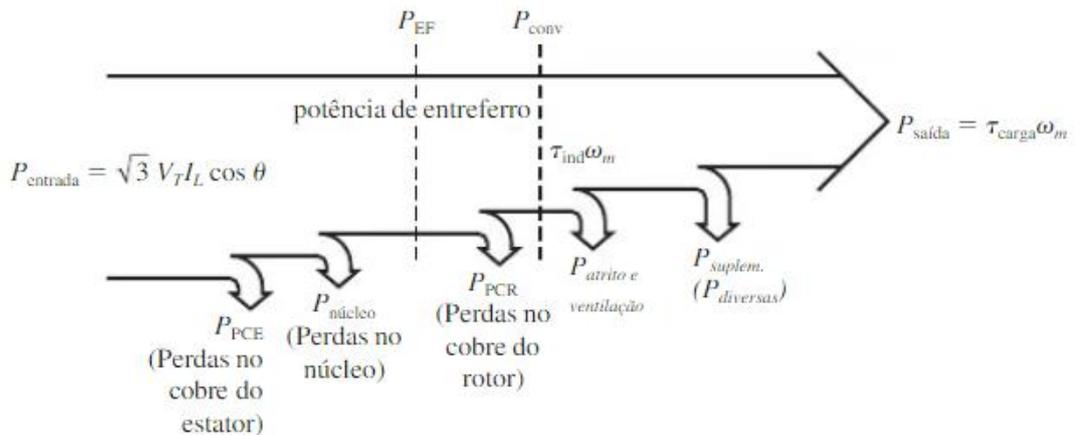
$$P_{in} = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta \quad (2)$$

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \quad (3)$$

$$P_{out} = \tau_{load} \omega_m \quad (4)$$

A Figura 4 ilustra ainda as perdas no cobre estáticas, as perdas no ferro, as perdas no cobre do rotor e as perdas devido a ventilação e atrito. Descontando todas as perdas, resta a potência de saída do motor.

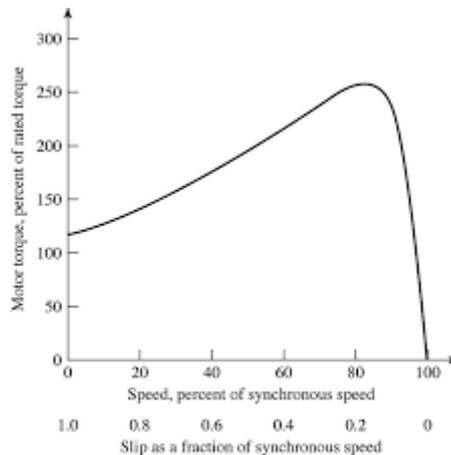
Figura 4 – Fluxo das Potências Motor de Indução



Fonte: Chapman (2013).

Na Figura 5, pode-se constatar que o ponto de torque máximo ocorre muito próximo da velocidade síncrona. Porém, quando se alcança um valor próximo da velocidade síncrona, o conjugado disponível tende a ser muito baixo.

Figura 5 – Curva Conjugado versus Velocidade



Fonte: Chapman (2013).

3.2 ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO

3.2.1 Importância dos ensaios

Os ensaios de motores de indução são de extrema importância para que se possa dimensionar os parâmetros internos dessas máquinas. Para a modelagem desses sistemas em simuladores como o EMTP-ATP, esses parâmetros internos são geralmente necessários (sobretudo, quando não existem outras estratégias de representação, como o uso de dados disponibilizados por fabricantes). Como visto anteriormente o circuito elétrico equivalente do motor de indução apresenta valores de resistências e reatâncias que são necessários na modelagem. Esses valores não são comumente disponibilizados pelas empresas, sendo assim estes ensaios se tornam ainda mais importantes. Apesar deste TCC tomar como base dados fornecidos por fabricantes ou outros meios, optou-se por estudar os ensaios e as suas representações no EMTP-ATP e ATPDraw como um meio de aprendizado para a linha de pesquisa 1 (como expõe a seção “Metodologia de Pesquisa”).

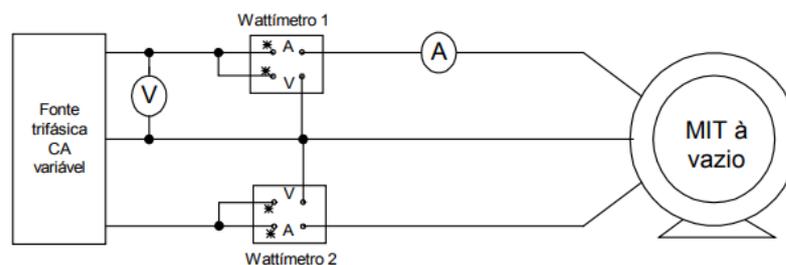
Dois ensaios típicos de motores de indução são denominados como a vazio e com rotor bloqueado

3.2.2 Ensaio a vazio

Nesse ensaio o motor é conectado a uma fonte trifásica de alimentação, com tensão nominal e é acionado sem carga, ou seja, a vazio. Após isso a potência e corrente no motor são medidas. Para a realização desse ensaio as ligações demonstradas na Figura 6 podem ser realizadas.

Para uma análise melhor do ensaio a vazio é necessário realizar a medição da resistência de enrolamento do estator, neste procedimento utiliza-se equipamentos apropriados, como uma ponte de Wheatstone, ou aplica-se uma tensão e se mede a corrente, utilizando o princípio da lei de Ohm. Pode-se então aferir o valor desse resistor, este parâmetro é muito importante pois com ele se pode saber as perdas nos enrolamentos.

Figura 6 – Diagrama ligação ensaio a vazio



$$P_{03\phi} = W_1 + W_2$$

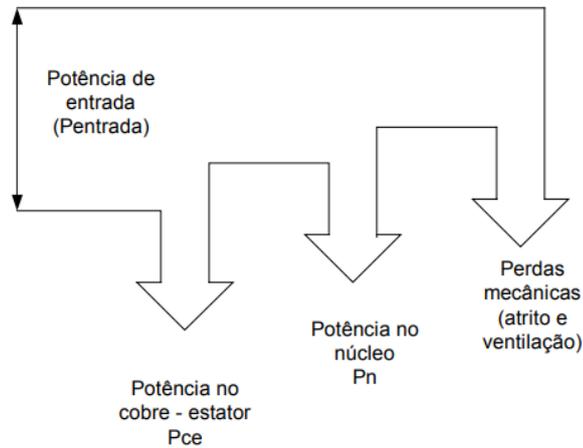
$$V_0 = \text{nominal}$$

$$I_0 = \text{corrente de linha do motor à vazio}$$

Fonte: CEFETES (2018).

Com a máquina trabalhando a vazio, a velocidade do rotor é muito próxima da velocidade síncrona. Isso faz com que a corrente no rotor seja muito baixa, próxima a zero. Pode-se afirmar que as perdas no cobre do rotor são desprezíveis e o fluxo de potência apresenta as características apresentadas na Figura 7. No ensaio a vazio, consideramos em um nível básico somente as perdas no ferro. As perdas por atrito e ventilação são ignoradas (ou somadas junto com as perdas do ferro).

Figura 7 – Fluxo da potência ensaio a vazio

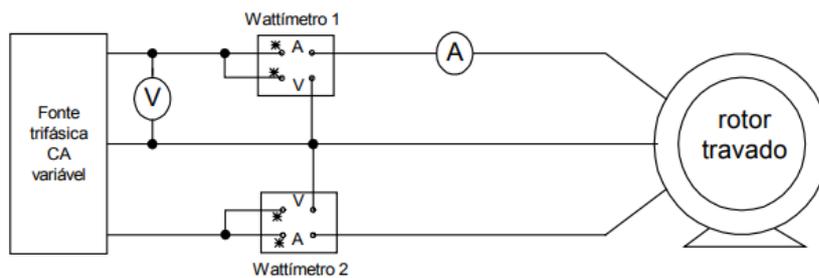


Fonte: CEFETES (2018).

3.2.3 Ensaio de rotor bloqueado

Para esse ensaio deve-se aplicar uma tensão menor a ponto de garantir a corrente nominal no circuito do estator, bloqueia-se o rotor, assim o impedindo de rotacionar. Com esse objetivo recomenda-se o esquema de ligação representado na Figura 8.

Figura 8 – Diagrama ligação ensaio rotor bloqueado



$$P_{rt3\phi} = W_1 + W_2$$

$$V_{rt} = \text{tensão de rotor travado}$$

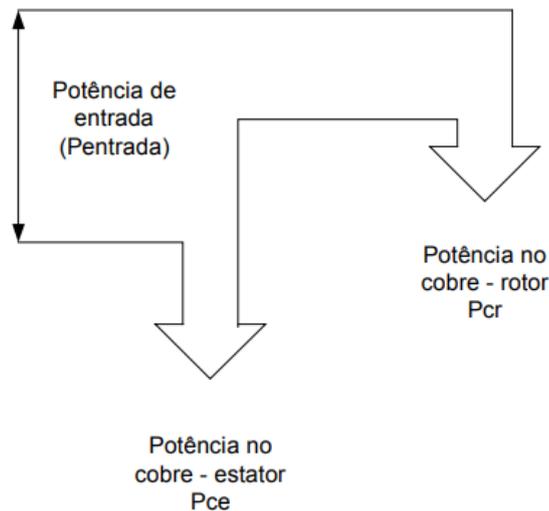
$$I_{rt} = \text{corrente no min al de linha do motor}$$

Fonte: CEFETES (2018).

No ensaio de rotor bloqueado, as perdas no núcleo podem ser desprezadas, pois as mesmas dependem da tensão de entrada elevada ao quadrado. Como o rotor

está bloqueado, as perdas rotacionais não existem e toda a potência é dissipada nos enrolamentos do rotor e do estator, como representado na Figura 9.

Figura 9 – Fluxo da potência ensaio rotor bloqueado



Fonte: CEFETES (2018).

3.3 ANÁLISE TÉRMICA DE UM MOTOR DE INDUÇÃO

Ao analisar os dados de um fabricante, por exemplo, na placa de identificação do motor, quando se refere à potência mecânica útil entregue pelo eixo, este valor está geralmente atrelado a dois fatores, a temperatura do meio que não pode exceder 40 °C e altitude do local de operação que não pode ultrapassar 1000 m em relação ao nível do mar, (essas condições são estabelecidas pela norma ABNT NBR – 17094-1/2018).

As condições mencionadas não interferem com a capacidade do motor de entregar o conjugado e a potência nominais, do ponto de vista de suas características eletromagnéticas, pois as mesmas não sofrem interferência direta desses fatores. Entretanto, caso não sejam atendidos os fatores mencionados acima, haverá perdas resultantes do calor elevado, com o aumento da temperatura faz com que o motor seja incapacitado de entregar a potência nominal e reduz a vida útil do mesmo, em casos críticos pode até destruir o enrolamento do motor.

A expectativa de vida de um motor pode ser dita com base nas condições de seus enrolamentos, uma vez que para o reparo dos enrolamentos o custo é elevado. Isso pode atingir praticamente 50% do valor do motor original, sendo um conserto inviável do ponto de vista econômico.

3.3.1 Classes de isolamento térmico

Para realizar a especificação de um motor de indução é necessário levar dois pontos em consideração:

- O conjugado do motor de indução deve atender as solicitações de carga nominal, bem como sobrecargas momentâneas que possam ocorrer, de forma que sua velocidade não seja reduzida a ponto de prejudicar a operação.
- A máxima temperatura estatórica não deve exceder além da prevista para cada classe de isolamento térmico dimensionado, tendo atenção especial à resina ou verniz que envolvem o condutor que resultam nas bobinas.

O primeiro aspecto a ser observado é a relação denominada fator de sobrecarga, que é a relação entre o conjugado máximo do motor (C_{MAX}), ou seja, a carga não pode possuir conjugados resistentes que excedam o C_{MAX} . Este valor é sempre considerado em relação percentual ou em valores em relação ao conjugado nominal (C_n), o fator de sobrecarga λ é então representado na equação:

$$\lambda = \frac{C_{MAX}}{C_n} \quad (4)$$

O segundo aspecto a ser observado na hora da escolha da classe de isolamento térmico adequado, obedecendo as normalizações, são os materiais que compõem os sistemas de isolamento térmico do motor, que são agrupados em classes. Estas classes são divididas pelo máximo valor que cada um dos componentes pode suportar sem que cause danos e nem diminua a vida útil do motor.

Esta análise térmica não se dá ao enrolamento como um todo, mas sim a qualquer ponto do enrolamento, visto que a distribuição térmica do enrolamento não é de maneira uniforme, pois o mesmo contém ranhuras, coroas. Fazendo assim com que a análise do material deve levar em consideração que nenhuma das partes do

enrolamento exceda a temperatura máxima definida para cada classe de isolamento térmico, as classes de isolamento térmico são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Temperatura máxima dos enrolamentos por classe.

CLASSE DE ISOLAMENTO TÉRMICO	TEMPERATURA MÁXIMA DOS ENROLAMENTOS (°C)
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

Fonte: Collares (2021).

O Quadro 1 apresenta as classes de isolamento térmico, as temperaturas padronizadas para componentes do motor e as máximas temperaturas admissíveis nos enrolamentos.

No entendimento do isolamento térmico é preciso levar em consideração que se parte da temperatura ambiente, normalizada em 40 °C, e a temperatura resultante das perdas. Sendo assim, levando-se em consideração um motor classe B, com temperatura máxima em 120 °C, partindo dos 40 °C, significa que esta classe suporta um aumento de 80°C quando em operação. Assim que o motor atingir o regime permanente e seu equilíbrio térmico, a temperatura ambiente e o aumento da temperatura não podem ultrapassar os 120 °C.

3.3.2 Aferição da temperatura dos enrolamentos

A norma NBR-17094-1/2013 define quatro métodos para aferição da temperatura dos enrolamentos do motor:

1. Método da variação de resistência;
2. Métodos dos detectores de temperaturas embutidos;
3. Método termométrico;
4. Método da superposição;

Destes métodos o mais utilizado é o da variação de resistências para aferição da temperatura de um motor, que usa a variação da resistência elétrica em relação à temperatura conforme a Equação 5.

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_A = \frac{(R_1 - R_2)}{R_1} * (235 + \theta_1) + (\theta_1 - \theta_A) \quad (5)$$

onde $\Delta\theta$ é a variação de temperatura do enrolamento, θ_2 é a temperatura dos enrolamentos no final do ensaio, θ_1 é a temperatura do enrolamento antes do ensaio, θ_a é a temperatura do meio externo no final do ensaio, R_2 é a resistência do enrolamento após o final do ensaio, R_1 é a resistência do enrolamento antes do ensaio e 235 é a aproximação da temperatura negativa do cobre na qual a resistência seria nula.

A equação 5 fornece o valor médio para a temperatura θ_2 , uma vez que R_1 e R_2 fornecem os valores de resistência, não apenas no ponto mais quente do estator, ou seja, a temperatura θ_2 obtida é inferior à temperatura do ponto mais quente do estator, então a diferença $\Delta\theta$ também representa um valor médio, e a elevação de temperatura deve sofrer um ajuste, uma vez que independente do regime, a máxima temperatura da classe não deve ser excedida. Por sua vez seguindo as normas brasileiras, tem-se no Quadro 2 e Equação 6.

Quadro 2 – Classe de isolamento térmico.

CLASSE DE ISOLAMENTO TÉRMICO	TEMPERATURA DE REFERÊNCIA (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA DA CLASSE DE ISOLAMENTO TÉRMICO (°C)	ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA (°c)	CONSTANTE K(°C)
A	40	105	60	5
E	40	120	75	5
B	40	130	80	10
F	40	155	105	10
H	40	180	125	15

Fonte: Collares (2021).

Ao analisar o quadro anterior, pode-se determinar a temperatura mais próxima do real, ou seja, a parte mais quente do enrolamento após o equilíbrio térmico. Essa temperatura é dado por:

$$T = T_o + \Theta + K \quad (6)$$

Onde T é a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, T_o é a temperatura ambiente e Θ é a elevação da temperatura do enrolamento quando o motor trabalha em regime contínuo.

3.4 CICLOS DE OPERAÇÃO

Os motores de indução têm vários regimes de trabalho, que são separados por períodos de operação e períodos de repouso. Por exemplo, uma bomba de um sistema de reservatório de água tem seu regime dado por curtos períodos de operação e longos períodos de repouso. Já no caso de ventiladores industriais, o regime de operação é dado por longos períodos de operação e curto períodos de repouso.

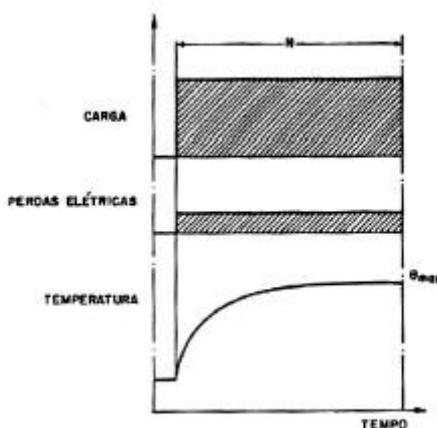
Ao levar em consideração a norma ABNT/NBR – 17094-1/2018, estabelece 10 (dez) ciclos operacionais ou regimes de trabalho, que são denominados de S1 a S10. Cada ciclo possui suas características e detalhes, e são separados entre seus períodos de operação e repouso. Analisando as condições térmicas do motor, cada ciclo tem sua representação gráfica da potência solicitada pelo eixo em relação ao tempo de funcionamento, sendo que quanto maior for o tempo de uso, menor será a numeração do ciclo. Sendo assim, os ciclos S1, S2 e S3 são os de tempo de operação e, em casos muito específicos podem ser construídos sobre medida para atender esses regimes.

3.4.1 Regime Contínuo (S1)

No regime S1, o motor aciona uma carga constante por um tempo suficientemente longo. Desse modo o motor atinge a sua temperatura de equilíbrio térmico como visto na Figura 10. Para considerar que um motor trabalha em regime contínuo S1, o motor precisa operar por tempo suficiente para atingir a temperatura

de equilíbrio térmico a partir deste momento têm seu funcionamento prolongado por horas, dias e até meses, sem repouso, para esse tipo de funcionamento são alguns exemplos os ventiladores, exaustores, bombas de movimentação de produtos nas indústrias químicas e refinarias, bombas de alimentação de caldeiras a vapor, etc.

Figura 10. Ciclo de operação S1



Fonte: Collares (2021).

Segundo a norma NBR – 17094-1/2018, caso o comprador não declare qual o tipo de regime o fabricante deve então considerar que o regime aplicado é o regime contínuo (S1), por esta normativa a maioria dos motores em serviço são especificados para o regime S1 na prática.

Para escolha de motores para o ciclo de operações S1 deve-se certificar que a potência nominal é a imediatamente superior à requerida. Assim, caso o motor seja submetido durante seu funcionamento a uma sobrecarga maior que 1,00 ele operará com uma elevação de temperatura que será menor que a temperatura limite de sua classe de isolamento térmico.

De acordo com a NBR – 17094-1/2018:

“No caso de motores monofásicos ou polifásicos, abertos ou totalmente fechados com ventilação externa, de potência nominal igual ou inferior a 150 kW (200 cv), com classificação térmica 130(B) ou 155(F), o comprador pode optar pela escolha de um motor com fator de serviço. Fator de serviço é um multiplicador que, quando aplicado à potência nominal do motor, indica a carga que pode ser acionada continuamente sob tensão e frequência nominais e com limite de elevação de temperatura do enrolamento, determinado pelo método

da variação de resistência, 10 K acima do limite indicado na Tabela 10. Os valores de rendimento, fator de potência e rotação podem diferir dos valores nominais, porém o conjugado e a corrente com rotor bloqueado e o conjugado máximo permanecem inalterados. A utilização do fator de serviço implica uma vida útil inferior àquela do motor com carga nominal.”

A Tabela 1 relaciona as potências nominais dos motores, com seus respectivos fatores de serviço, em diferentes velocidades síncronas.:

Tabela 1 – Fatores de serviço.

Potência nominal		Fator de serviço			
kW	cv	Rotação síncrona (rpm)			
		3600	1800	1200	900
0,037	1/20	1,4	1,4	1,4	1,4
0,06	1/12	1,4	1,4	1,4	1,4
0,09	1/8	1,4	1,4	1,4	1,4
0,12	1/6	1,35	1,35	1,35	1,35
0,18	1/4	1,35	1,35	1,35	1,35
0,25	1/3	1,35	1,35	1,35	1,35
0,37	1/2	1,25	1,25	1,25	1,15 ^a
0,55	3/4	1,25	1,25	1,15 ^a	1,15 ^a
0,77	11,0	1,25	1,15 ^a	1,15 ^a	1,15 ^a
1,1 a 150	1,5 a 200	1,15 ^a	1,15 ^a	1,15 ^a	1,15 ^a

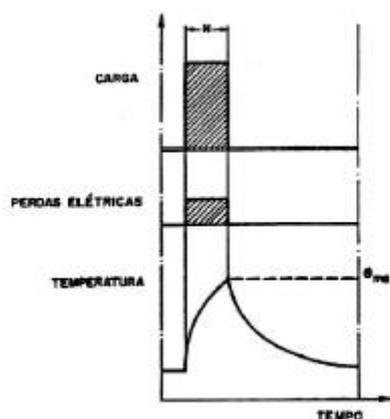
^a No caso de motores gaiola, estes fatores de serviço se aplicam somente às categorias N e H.

Fonte: Collares (2021).

3.4.2 Regime de tempo limitado (S2)

No regime S2, o motor aciona a carga por um curto período de tempo, atingindo a temperatura máxima do isolamento térmico. Após isso, a máquina passa por um longo período de repouso, para o motor alcançar a temperatura do meio externo, como observado na Figura 11.

Figura 11 – Ciclo de operação S2



Fonte: Norma NBR – 17094-1/2018

A partir da análise da Figura 11, nota-se graficamente que o motor pode retornar à temperatura inicial. Exemplos práticos desse ciclo de operação são: sistemas de abertura e fechamento de válvulas, portões elétricos e sistemas basculantes.

Os motores que são construídos para o regime S2 possuem em sua placa indicações da potência desenvolvida em condições de tempos de operações. Os valores usuais são de 10, 20, 60 e 90 minutos. A abreviação apropriada para indicar que o motor trabalha nesse regime é S2, seguido do tempo do regime, por exemplo, S2 20 para um trabalho de 20 minutos.

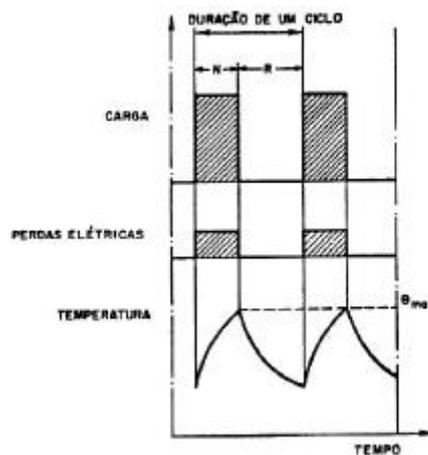
Levando em conta que o motor hipotético foi projetado para trabalhar em regime S1, ele poderá operar com uma carga maior que a sua potência nominal no ciclo de operação S2. Nesse caso, apenas a capacidade térmica máxima não pode ser ultrapassada.

3.4.3 Regime intermitente periódico (S3)

Neste regime, denominado de intermitente periódico, o motor aciona uma carga e repete uma sequência de ciclos idênticos, compostos por um período de carga constante seguido de um período de repouso. Isso faz com que a temperatura nos enrolamentos da máquina varie entre a temperatura máxima de sua classe térmica e um valor próximo da temperatura do meio refrigerante.

Ao analisar a Figura 12 é possível verificar que o regime é separado por ciclos com carga e repouso. Em relação às perdas elétricas, são também separadas em ciclos nos quais têm carga seguido de períodos de repouso. A temperatura atinge valores próximos do limite máximo durante o período de carga. Logo após isso o motor segue por um momento de repouso em que é resfriado até uma temperatura próxima do ambiente. Além disso, o ciclo funciona de tal forma que a corrente de partida não afeta de forma significativa a elevação de temperatura.

Figura 12 – Ciclo de operação S3



Fonte: Norma NBR – 17094-1/2018

Com base na Figura 12, o fator de duração do ciclo pode ser definido como

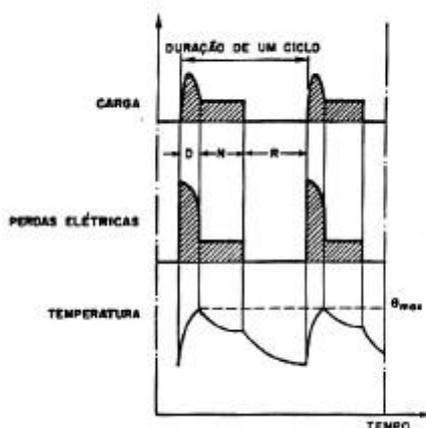
$$Fator\ duração\ do\ ciclo = \frac{\Delta t_p}{T_c} = \frac{\Delta t_p}{\Delta t_p + \Delta t_R} \quad (5)$$

O fator de duração do ciclo é utilizado para a representação de motores deste regime de trabalho, nos dados de placa destes motores são representados por S3 40%, por exemplo. Onde é denominado o regime e o fator de duração do ciclo.

3.4.4 Regime intermitente periódico tipo (S4)

Neste regime o motor opera com uma sequência de ciclos parecidos com o do tipo S3, porém, para este ciclo, não é possível desprezar a influência do calor produzido pela corrente de partida. Dentro do padrão de intervalo de tempo padronizado pela norma, que é de uma hora, ocorre um elevado número de partidas, comparando com o S3, motores deste regime são capazes de suportar 150 até 600 partidas no período de uma hora, demonstrado na figura 13.

Figura 13 – Ciclo de operação S4



Fonte: Norma NBR – 17094-1/2018

Analisando a Figura 16, nota-se que ocorre um *overshoot* da carga na partida, tornando-se constante após o tempo de acomodação. As perdas elétricas sofrem junto com a carga um *overshoot*, durante os intervalos de aceleração/partida. Percebe-se que a temperatura do motor, sofre um aumento considerável na partida devido ao comportamento da corrente que assume valores muito altos. Novamente, a temperatura máxima dos enrolamentos, que é atingida na partida, e a temperatura mínima atingida nos enrolamentos não podem ultrapassar o limite máximo da classe

de isolamento térmico do motor, nem o limite mínimo pode ultrapassar a do meio refrigerado.

O ciclo deste motor é dado pela Equação 6:

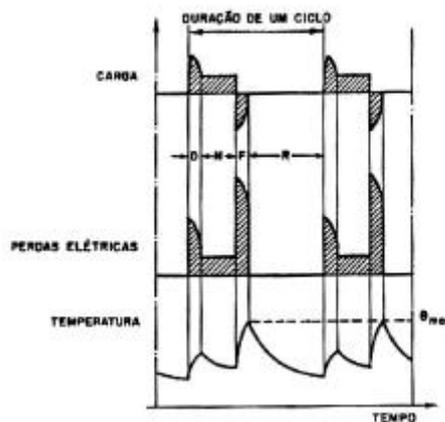
$$Fator\ duração\ do\ ciclo = \frac{(\Delta t_D + \Delta t_p)}{T_c} = \frac{(\Delta t_D + \Delta t_p)}{\Delta t_p + \Delta t_R + \Delta t_D} \quad (6)$$

Motores construídos para regime de trabalho S4, devem ter em suas placas de dados, que se encontra na máquina, a representação de quais valores dentro deste regime ele trabalha, a denominação é dada por: S4 30% $J_M=0,20\text{ kg.m}^2$ $J_{ext}=0,9\text{ kg.m}^2$, tendo J_m a inércia do motor e J_{ext} a inércia da carga aceita por esta máquina.

3.4.5 Outros Regimes

No regime tipo S5, regime intermitente periódico com frenagem elétrica, o motor opera em ciclo idênticos e passa por quatro períodos, partida, carga constante, frenagem elétrica e por fim o repouso. O período de frenagem pode ser feito através de uma corrente contínua, assim como no regime S4, o regime S5 é dado o número de ciclos em uma hora, padronizado pela norma. O diagrama operacional do ciclo é representado na Figura 14.

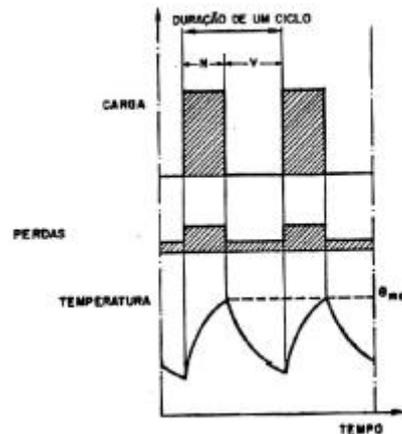
Figura 14 – Ciclo de operação S5



Fonte: Norma NBR – 17094-1/2018

No regime tipo S6, regime de funcionamento contínuo com a carga intermitente, o motor passar por uma sequência de ciclos idênticos. Onde o motor é submetido a ciclos de períodos em operação com carga constante, seguidos de um período de funcionamento em vazio, sem repouso entre ciclos, como representado na Figura 15.

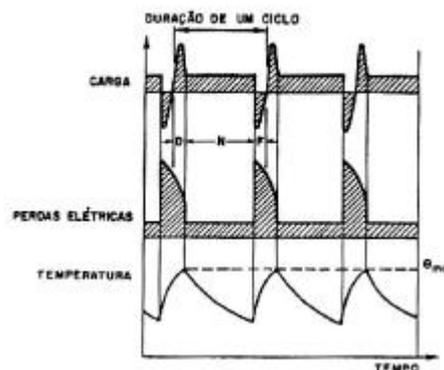
Figura 15 – Ciclo de operação S6



Fonte: Norma NBR – 17094-1/2018

No regime S7, regime de funcionamento contínuo com frenagem elétrica, têm-se uma sequência de ciclos separado em três etapas, a partida, funcionamento a carga constante e período de frenagem. Como no regime S6, não há período de repouso e seu diagrama é representado na Figura 16.

Figura 16 – Ciclo de operação S7

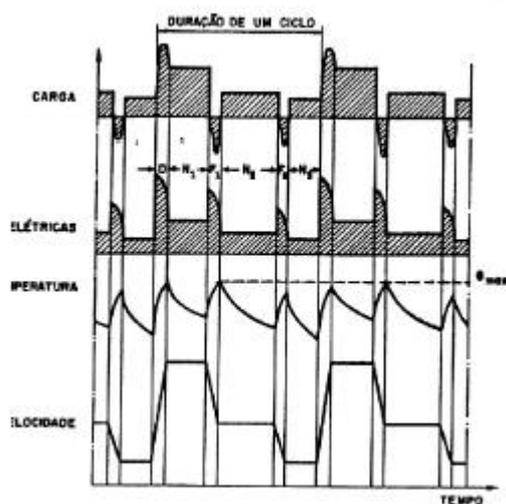


Fonte: Norma NBR – 17094-1/2018

O regime S8, regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade, é composto de uma sequência de ciclos idênticos e cada um deles é composto de um tempo de partida e um tempo de funcionamento em carga

constante com velocidade pré-determinada. Eles são seguidos de outros períodos de funcionamento com outras cargas, cada uma com a sua velocidade pré-determinada, como é possível observar no diagrama representado na Figura 19.

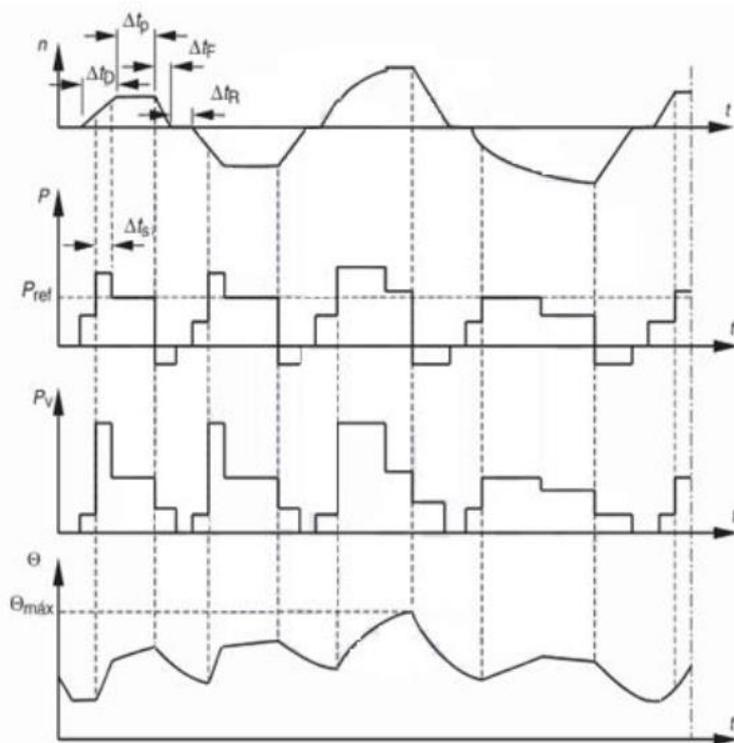
Figura 17 – Ciclo de operação S8



Fonte: Norma NBR – 17094-1/2018

No regime S9, regime com variações não periódicas de carga e rotação, o motor opera em sequências não periódicas, mas dentro de uma faixa de funcionamento que seja admissível. O diagrama do ciclo de operação S9 é representado na Figura 18.

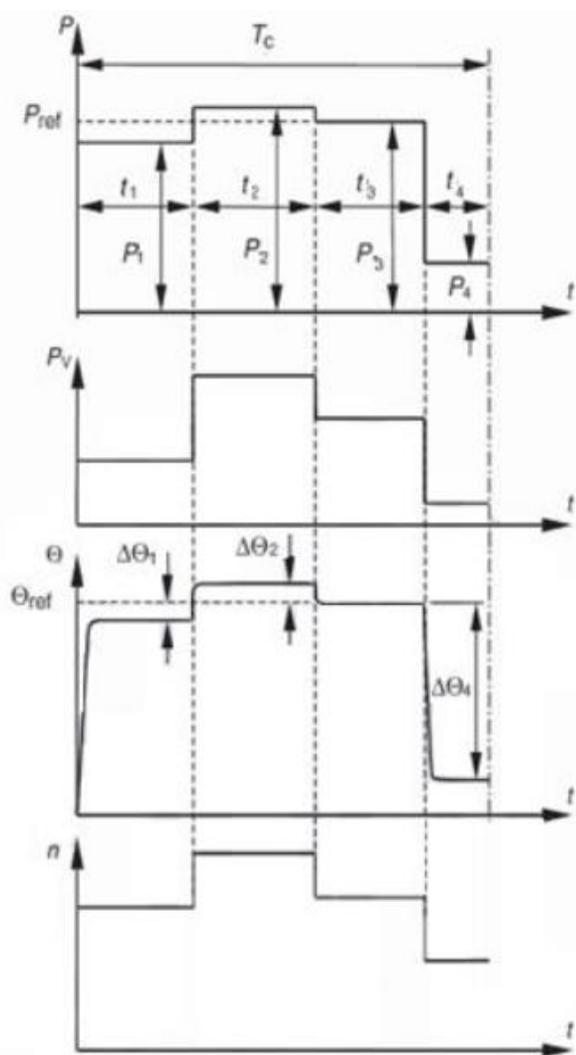
Figura 18 – Ciclo de operação S9



Fonte: Norma NBR – 17094-1/2018

No regime S10, regime com cargas e rotações distintas, o motor opera com uma quantidade específica de cargas de valores distintos. Se for possível, trabalha também com uma variedade específica de valores de velocidade rotórica. Para cada combinação carga/rotação, deve ser mantido um tempo suficiente para equilíbrio térmico do motor ser atingido. Além disso, o ciclo S10 pode demonstrar uma carga mínima durante um ciclo pode assumir valor zero, para repouso e operação a vazio, como representado no diagrama da Figura 19.

Figura 19 – Ciclo de operação S10



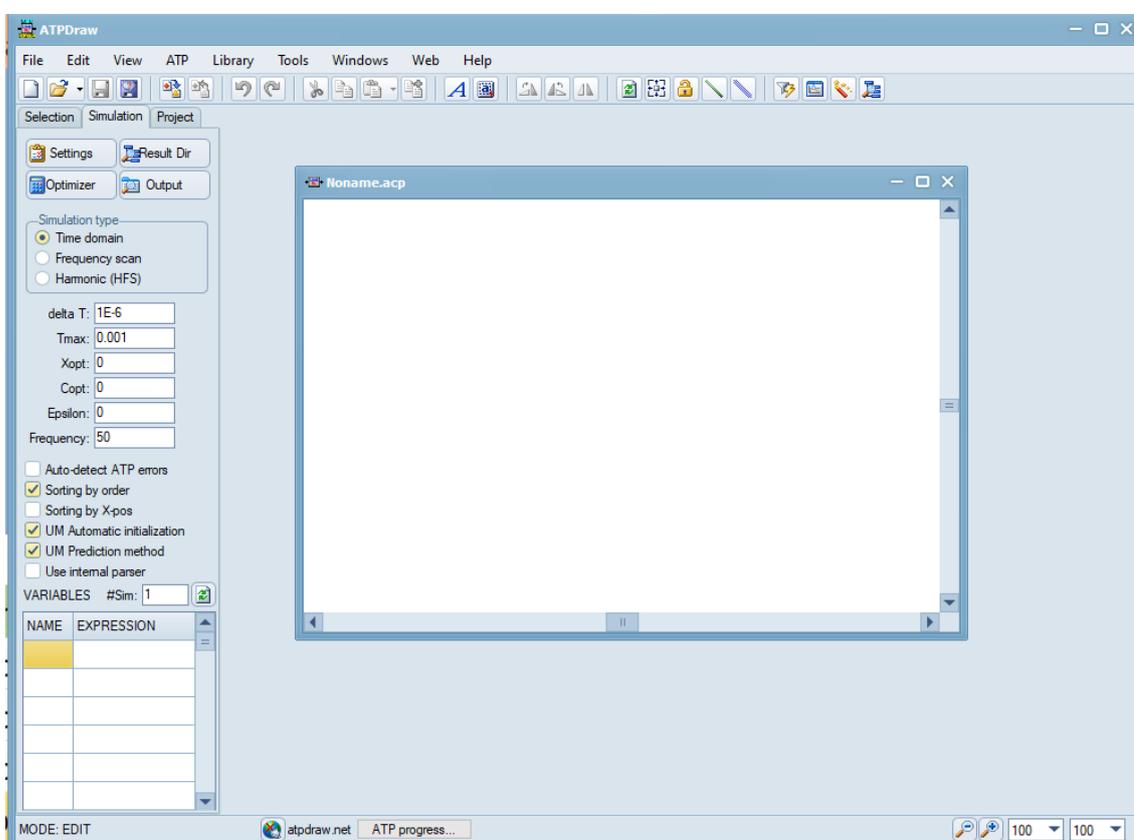
Fonte: Norma NBR – 17094-1/2018

4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

4.1 O EMTP-ATP E O ATPDRAW

O EMTP-ATP (*Eletromagnetic Transients Program – Alternative Transients Program*) é um simulador utilizado para a análise de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos. Neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), é utilizado ainda o ATPDraw um pré-processador gráfico para o EMTP-ATP, e o PlotXY, uma ferramenta computacional para gerar gráficos.

Figura 20 – Tela inicial ATPDraw



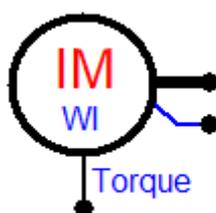
Fonte: Collares (2021).

4.2 MODELAGEM DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS NO EMTP-ATP E NO ATPDRAW

Para a modelagem de motores de indução trifásicos no EMTP-ATP e no ATPDraw, duas representações foram exploradas: “*Induction WI*” e “*UM3 Induction*”.

A representação “*Induction WI*” é conhecida como “UMIND” (*universal induction machine with manufacturer's data input*). Ela é uma representação de uma máquina de indução universal, configurada a partir de dados do fabricante. Nesse sentido, o EMTP-ATP encarrega-se de estimar os parâmetros internos do motor de indução por meio dos dados informados pelo usuário. Além disso, é possível modelar tanto máquinas com rotor bobinado quanto com rotor em gaiola de esquilo. O bloco “UMIND” é ilustrado na Figura 21.

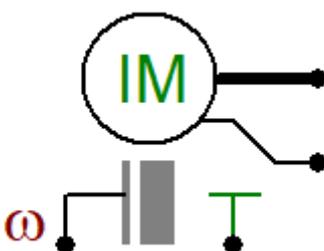
Figura 21 – Bloco “UMIND”



Fonte: Collares (2021).

O bloco “UM3 *Induction*”, é utilizado quando se sabe os valores dos parâmetros internos do motor de indução. O bloco é demonstrado na Figura 22.

Figura 22 – Bloco “UM3 *Induction*”.



Fonte: Collares (2021).

Outro desafio na modelagem de indução é representar os parâmetros mecânicos envolvidos no problema. O EMTP-ATP trabalha com uma analogia entre sistemas elétricos e mecânicos. O Quadro 3 apresenta essas equivalências.

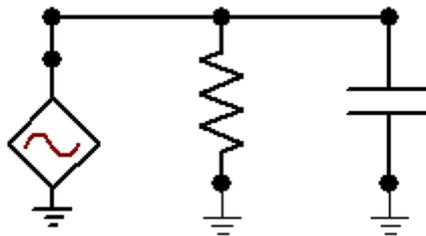
Quadro 3. Analogia entre parâmetros mecânicos e elétricos.

PARÂMETRO MECÂNICO	EQUIVALENTE ELÉTRICO
$T_C =$ Conjugado de Carga [N.m]	$I =$ Corrente Elétrica [A]
$J =$ Momento de inércia [kg.m ²]	$C =$ Capacitância [F]
$D =$ Coeficiente de Atrito [N.m.s/rad]	$G =$ Condutância [1/Ω]
$\omega =$ Velocidade Angular [rad/s]	$V =$ Tensão [V]

Fonte: Collares (2021).

As equivalências organizadas acima são de 1 para 1. Com este conhecimento é possível construir o circuito elétrico mostrado na Figura 23, em analogia com o sistema mecânico. Para simulações é utilizada neste circuito equivalente ou a representação do conjugado da carga, pela fonte de corrente ou a velocidade angular, representada pela fonte de tensão. A Figura 26 representa um sistema com uma carga.

Figura 23 – Circuito equivalente dos parâmetros mecânicos.



Fonte: Collares (2021).

A próxima etapa foi determinar os valores dos elementos utilizados no circuito 26. Para encontrar o momento de inércia, que é representado por um capacitor foi utilizada a equação 7:

$$J_T = J_M + J_C \quad (7)$$

Onde J_m é o momento de inércia do motor e J_c é o momento de inércia da carga pode-se calcular J_C pela equação 8.

$$J_C = 0.04 \cdot (P_M)^{0.9} \cdot (P)^{2.5} \quad (8)$$

Assim, é possível determinar o J_T e, por consequência encontrar a capacidade equivalente com uso da Equação 9.

$$C = J_T \cdot 10^6 \quad (9)$$

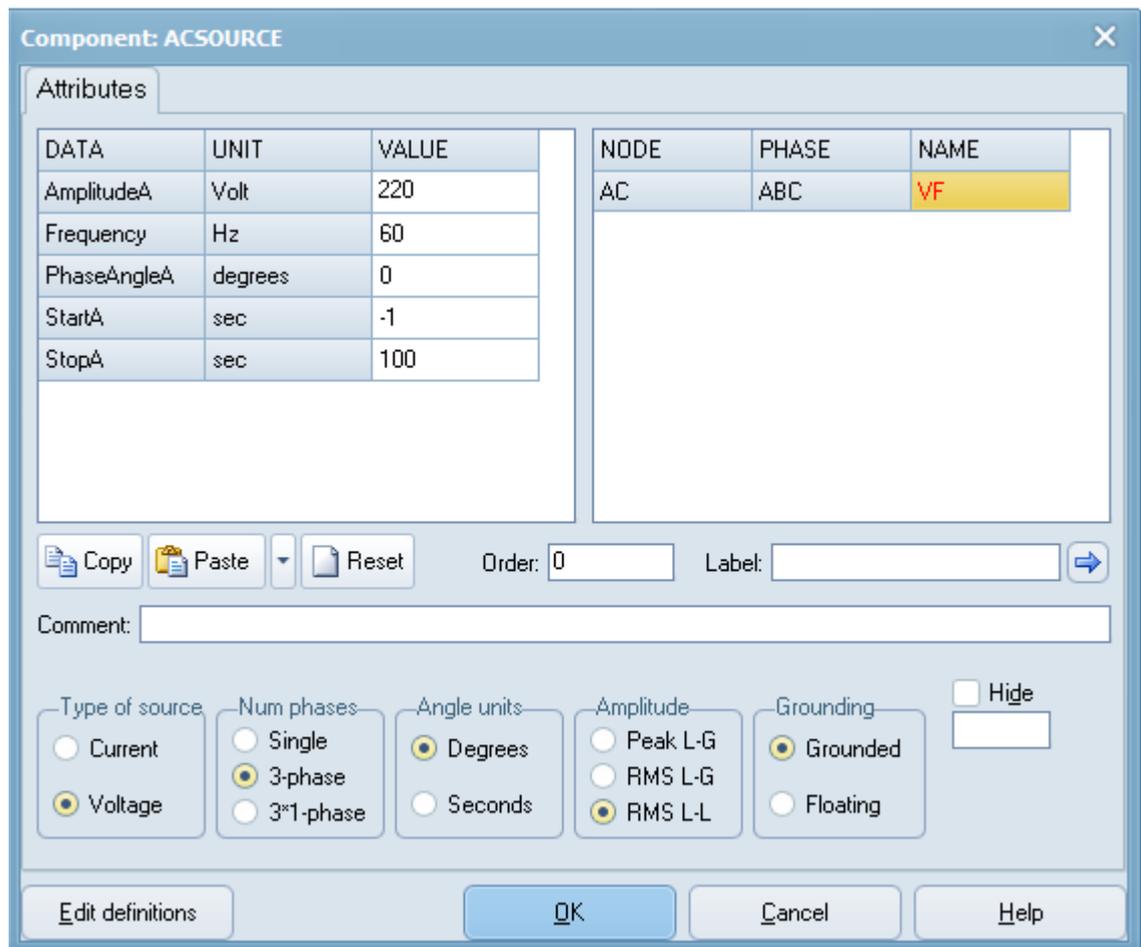
O próximo passo envolve encontrar o resistor deste sistema equivalente. Para tanto deve-se executar a Equação 10.

$$R = \frac{\omega \cdot 2 \cdot \pi}{C_n \cdot 60} \quad (10)$$

4.2.1 Modelagem do circuito no ATPDraw

Para a modelagem do circuito apresentado na figura 28. Será utilizado os dados do fabricante apresentados no Quadro 4, como explorado anteriormente o único bloco que cabe a este estudo seria o bloco “UMIND”, sendo ele o apto a utilizar dados de placa do fabricante do motor, após esta escolha é construído o circuito apresentado na Figura 25. Uma fonte de alimentação é utilizada com os dados apresentados na Figura 24.

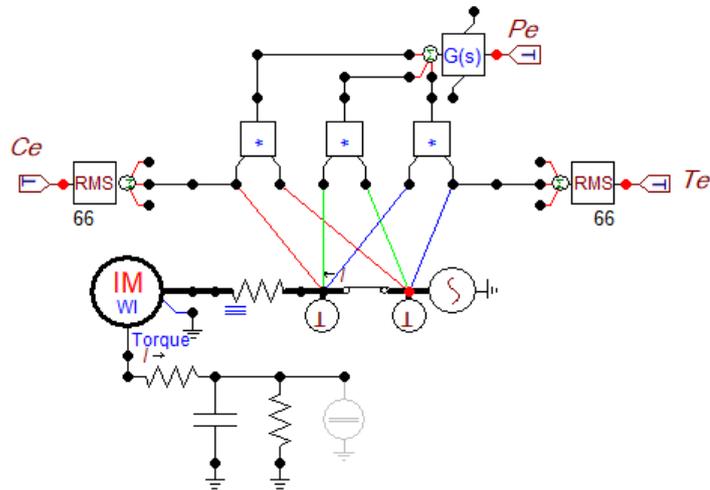
Figura 24 – Detalhes fonte de tensão de entrada.



Fonte: Collares (2021).

O circuito modelado é composto, pela fonte trifásica, com dados demonstrados na Figura 24, seguido de “probes” de medição, adicionados ao circuito para medição de corrente de fase, tensão de fase e cálculo da potência ativa, todos estes dados referentes ao estator, adicionado um resistor trifásico para um controle de medição, com valor de $0,0001 \Omega$, conectado a esse resistor temos a entrada do estator do bloco utilizado para representar o motor, onde é inserido os dados do Quadro 4, como demonstrado na Figura 29, na conexão do rotor desde motor é então inserido o circuito equivalente demonstrado na Figura 26.

Figura 25 – Circuito modelado para simulação de ensaios



Fonte: Collares (2021).

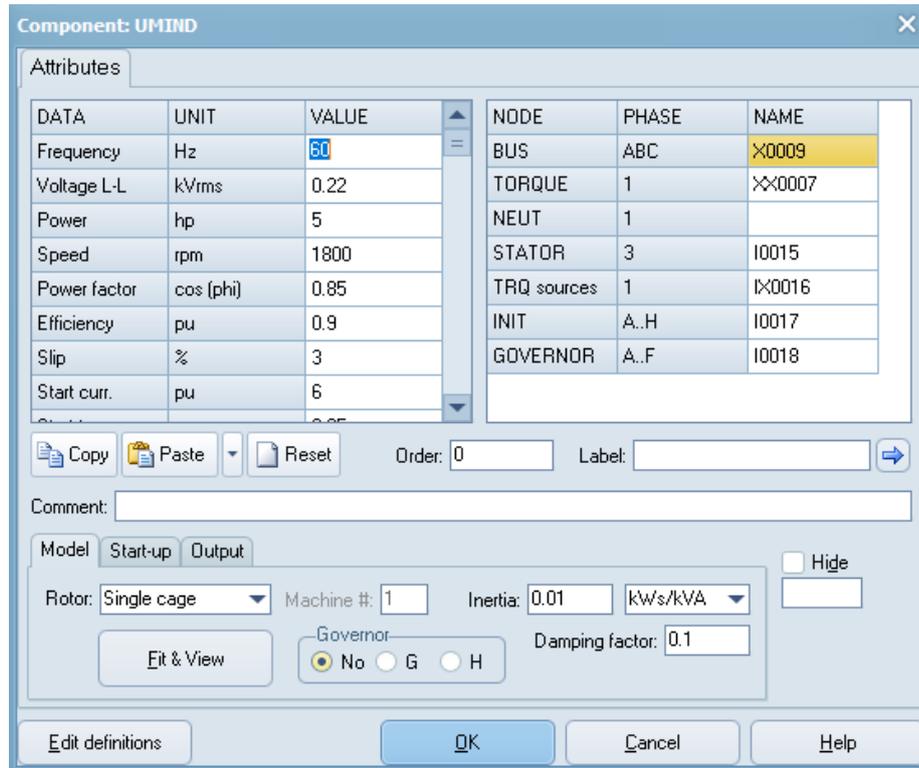
O Quadro 4 apresenta os dados do motor utilizado para as simulações.

Quadro 4 – Dados tabelados do motor de indução.

Frequência (Hz)	60
Voltagem L – L (Vrms)	220
Potência (hp)	5
Velocidade (rpm)	1800
Fator de Potência (cos(phi))	0.8
Eficiência (pu)	0.9
Escorregamento (%)	3
Corrente de partida (pu)	6
Torque de partida (pu)	0.65
Torque da Carga (pu)	0.001
Torque máximo (pu)	2.5

Fonte: Collares (2021).

Figura 26 – Detalhes do motor simulado.



Fonte: Collares (2021).

Com estes valores inseridos no software é possível calcular todos os parâmetros internos deste motor, como demonstrado na figura 27.

Figura 27 – Parâmetros internos do motor.



Fonte: Collares (2021).

4.3 SIMULAÇÕES DOS ENSAIOS

As seguintes simulações dos ensaios foram realizadas:

- Ensaio a vazio
- Ensaio de rotor bloqueado
- Ensaio a plena carga.

Todas as simulações apresentadas nesta seção foram simuladas com os parâmetros de configurações do ATPDraw apresentados na Figura 28.

Figura 28 – Parâmetros da simulação dos ensaios

Simulation type

Time domain
 Frequency scan
 Harmonic (HFS)

delta T: 1E-5
Tmax: 1
Xopt: 60
Copt: 60
Epsilon: 0
Frequency: 60

Auto-detect ATP errors
 Sorting by order
 Sorting by X-pos
 UM Automatic initialization
 UM Prediction method
 Use internal parser

VARIABLES #Sim: 1

Fonte: Collares (2021).

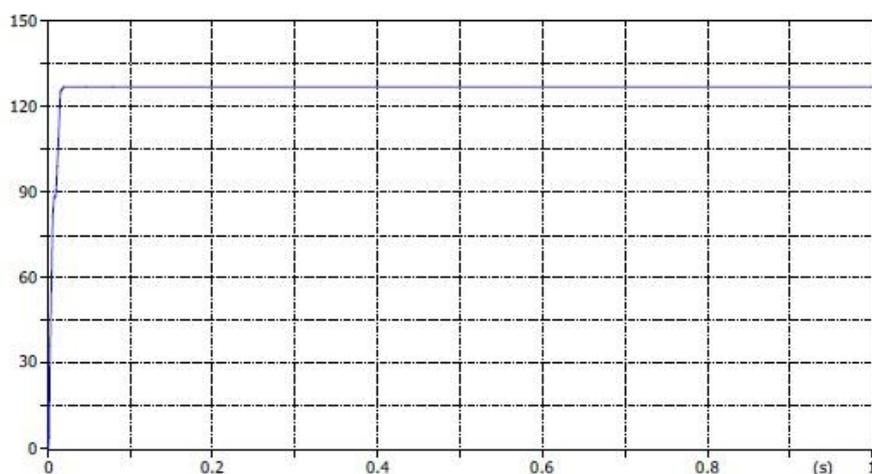
Na figura anterior, há a configuração de uma simulação no domínio do tempo com uma duração máxima de 1 segundo (Tmax). O intervalo de tempo utilizado (delta T) é igual a $1 \cdot 10^{-5}$ segundo e a frequência é equivalente a 60 Hz.

4.3.1 Ensaio a vazio

Para este ensaio será utilizado o circuito demonstrado na Figura 25. A fonte de tensão do equivalente mecânico é ativada, com uma tensão de 188,5 V. equivalente

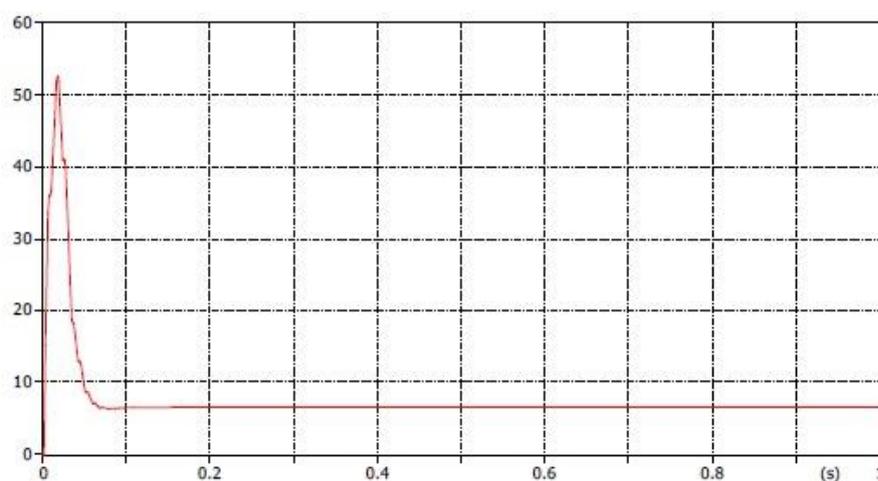
aos 188,5 rad/s, que condizem com a velocidade angular síncrona de 1800 rpm. Isso almeja que o escorregamento do motor seja nulo. Assim, a análise do motor ocorre a vazio, com um torque aproximadamente igual a zero. Nas Figuras 29, 30 e 31, apresentam-se respectivamente os sinais de tensão de fase, corrente e potência ativa vistas no estator.

Figura 29 – Tensão do estator a vazio



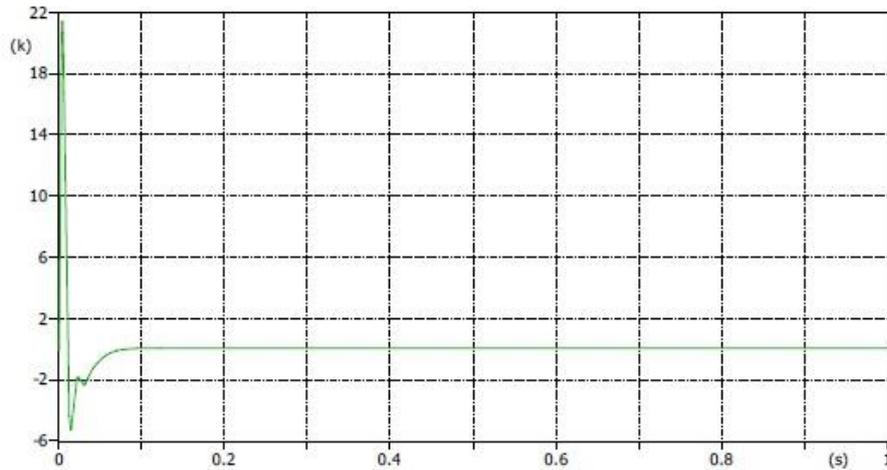
Fonte: Collares (2021).

Figura 30 – Corrente do estator a vazio



Fonte: Collares (2021).

Figura 31 – Potência do estator a vazio.



Fonte: Collares (2021).

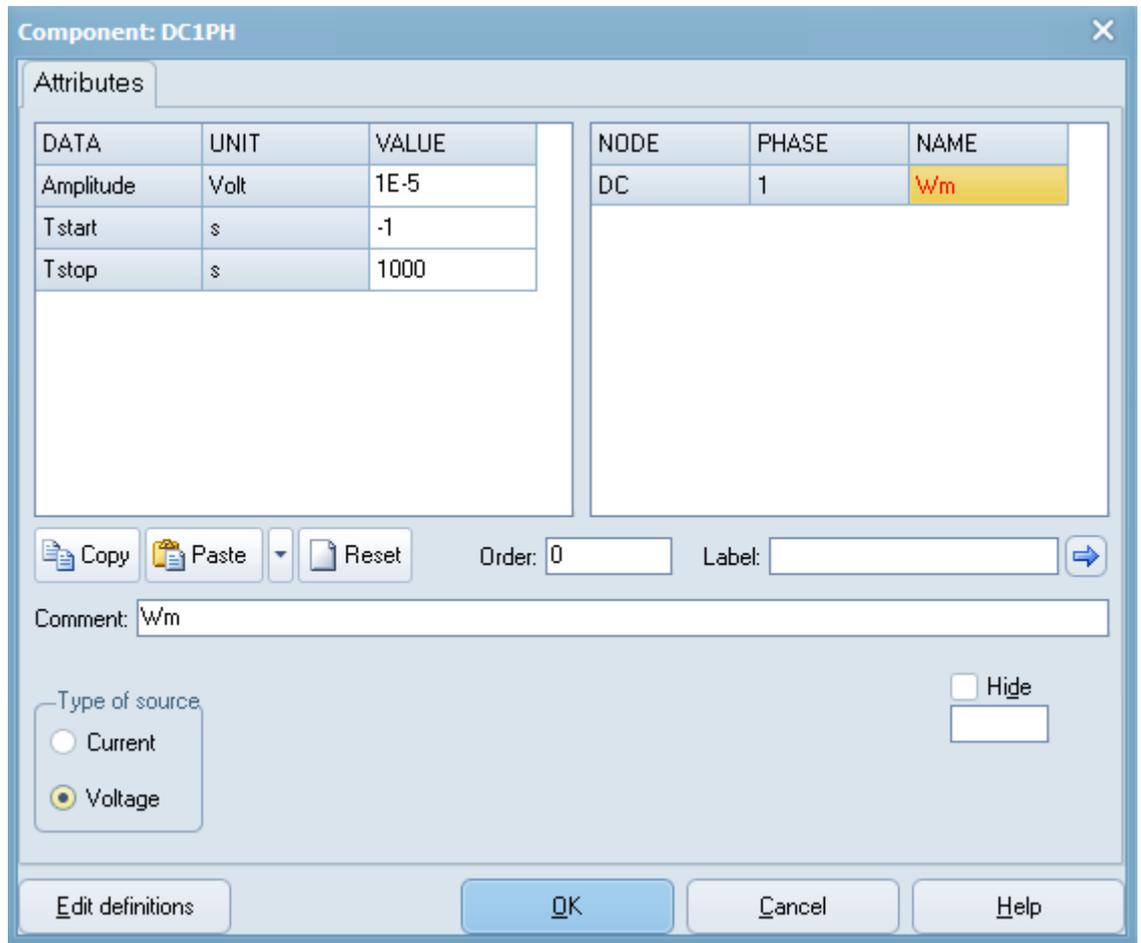
Os seguintes valores foram observados em regime permanente:

- Tensão no estator = 127 V
- Corrente no estator = 6.6 A
- Potência no estator = 74,71 W

4.3.2 Ensaio de rotor bloqueado

Para a realização deste teste foi aplicada uma tensão de 40 V. Este valor equivale a aproximadamente um quarto do valor nominal, sendo suficiente para estabelecermos a corrente nominal quando o rotor está bloqueado. Para chegar a este valor, foram executados testes com valores arbitrários a fim de se chegar a um valor próximo ao da corrente nominal. Cabe destacar ainda que a fonte de tensão do equivalente mecânico (representando a velocidade angular, é configurada com um valor muito pequeno (optou-se por 0.00001), pois não é possível atribuir um valor nulo no EMTP-ATP nessa situação. Essas configurações da fonte de tensão do equivalente mecânico podem ser visualizadas na Figura 32.

Figura 32 – Parâmetros fonte de tensão equivalente a velocidade angular.

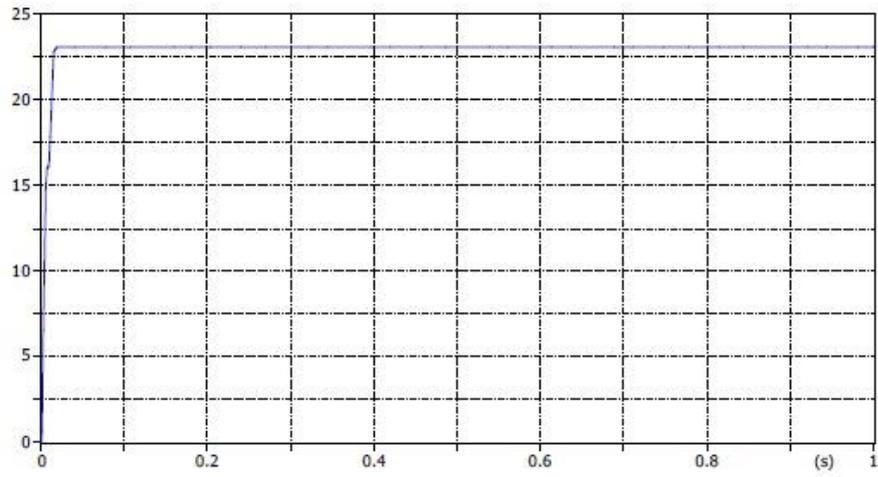


Fonte: Collares (2021).

Após a simulação ser executada foi possível constatar os seguintes resultados para tensão, corrente e potência no estator:

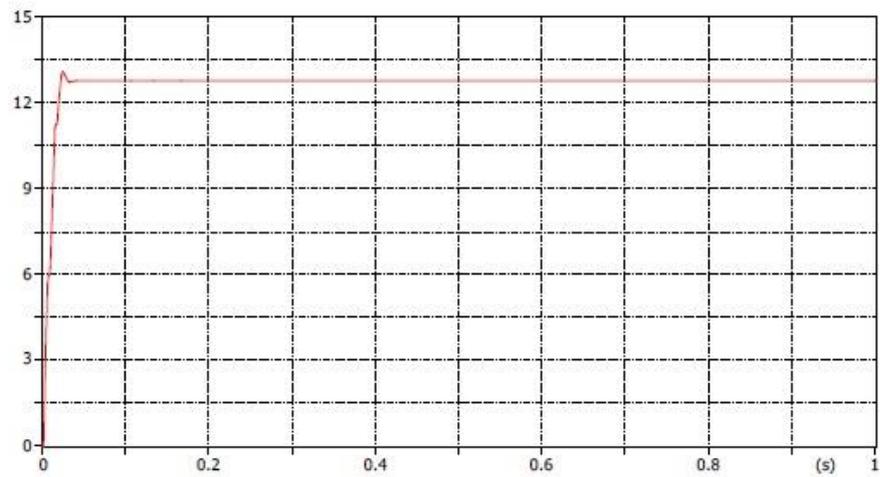
- Tensão no estator = 23 V
- Corrente no estator = 12,8 A
- Potência no estator = 469,76 W

Figura 33 – Tensão no estator com rotor bloqueado



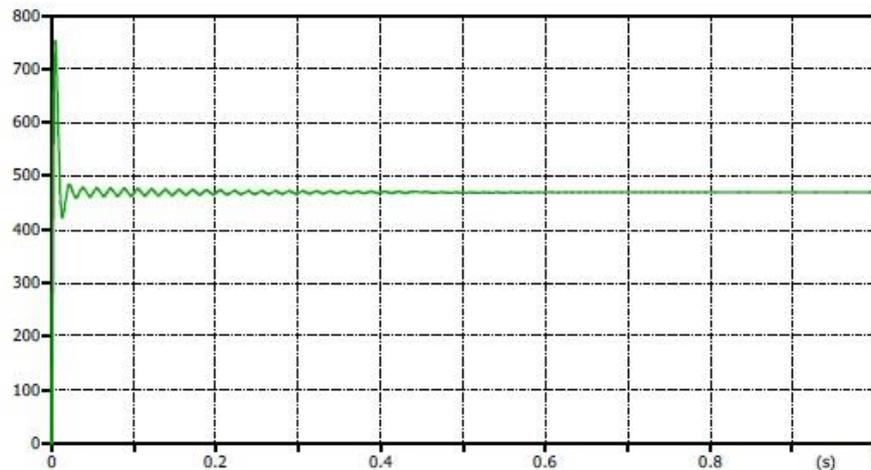
Fonte: Collares (2021).

Figura 34 – Corrente no estator com rotor bloqueado



Fonte: Collares (2021).

Figura 35 – Potência no estator com rotor bloqueado

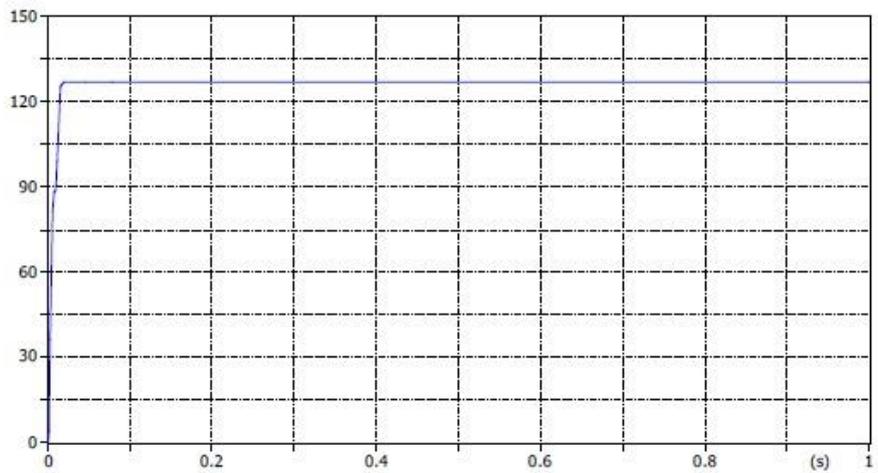


Fonte: Collares (2021).

4.3.3 Ensaio a plena carga

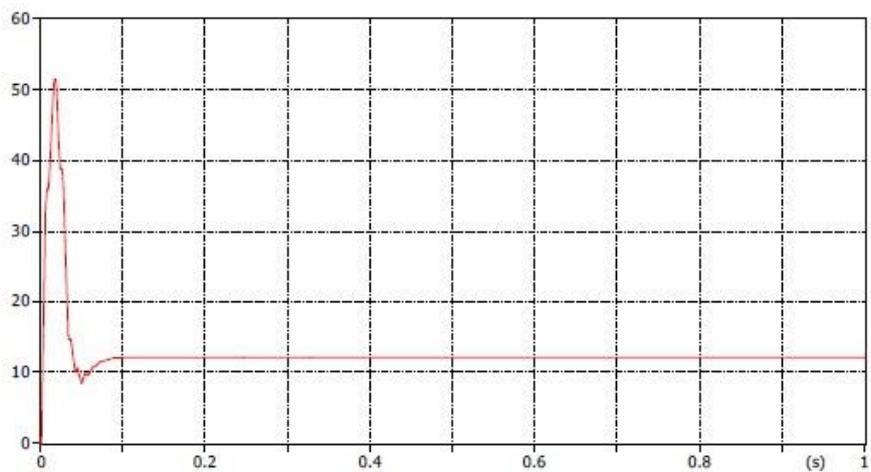
Para este ensaio, a fonte de alimentação do motor foi configurada com o valor nominal de 220 V. A fonte de tensão do equivalente mecânico foi atribuída com um valor referente à velocidade nominal e igual a 182,84 rad/s. Foi executada a simulação, onde foi analisada a tensão, corrente e potência ativa, representadas nas Figuras 36, 37 e 38 respectivamente.

Figura 36 – Tensão no estator a plena carga



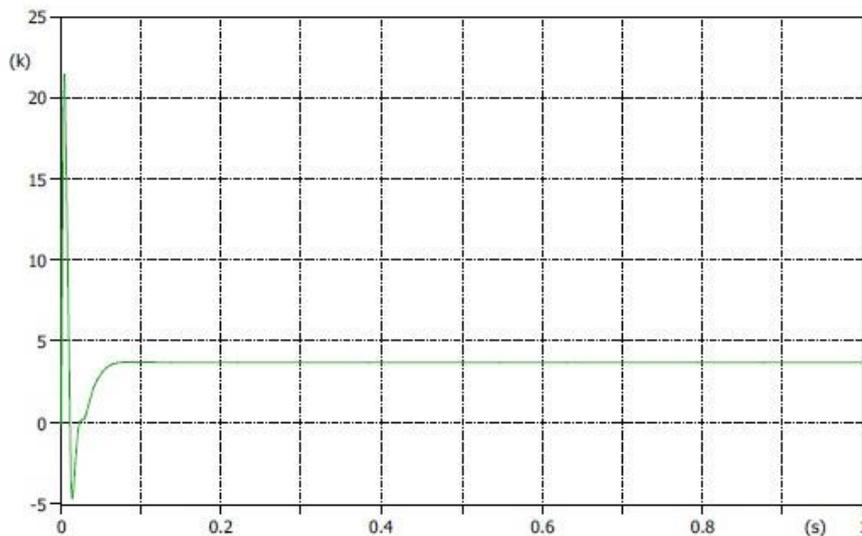
Fonte: Collares (2021).

Figura 37 – Corrente no estator a plena carga.



Fonte: Collares (2021).

Figura 38 – Potência no estator a plena carga.



Fonte: Collares (2021).

Com a análise dos gráficos anteriores, as informações mais relevantes que se tem são a potência que atinge 3742 W quando em regime permanente. Se tratando de um motor de 5 CV e sabendo que 1 CV é equivalente a 735,5 W, nota-se que o desempenho da máquina condiz com o esperado.

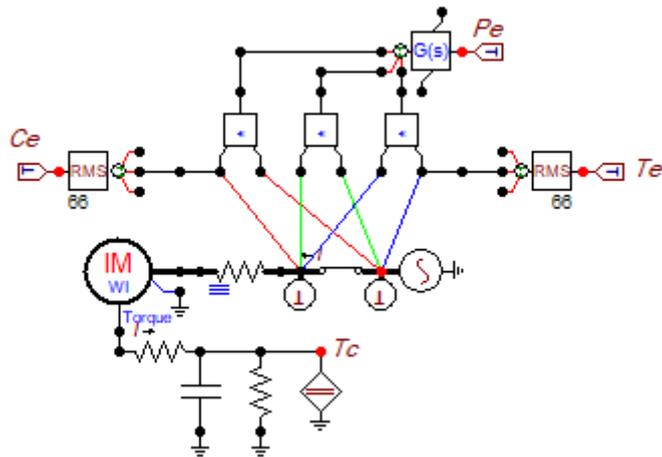
4.4 SIMULAÇÃO DOS CICLOS DE OPERAÇÕES

Neste tópico, serão demonstradas as simulações dos três primeiros ciclos de operações dos motores (S1, S2 e S3), sendo estes os mais usuais na prática.

4.4.1 Ciclo de operação S1

Para este ciclo, o motor é exposto a uma carga sem tempo de repouso. Para isto foi utilizado como base o mesmo circuito demonstrado na Figura 25. Porém, há uma mudança no equivalente mecânico. Antes era utilizada a fonte de tensão em CC para representar a velocidade angular. Agora uma fonte de CC é utilizada para representar o torque da carga (T_c), próximo do valor de plena carga demonstrado na Figura 41, tem-se o circuito da Figura 39.

Figura 39 – Circuito construído ciclo S1



Fonte: Collares (2021).

Fazendo uma comparação com o modelo utilizado nos ensaios, vê-se que apenas existe uma diferença na fonte de tensão do equivalente mecânico, A Figura 40 ilustra os parâmetros de simulação configurados no ATPDraw:

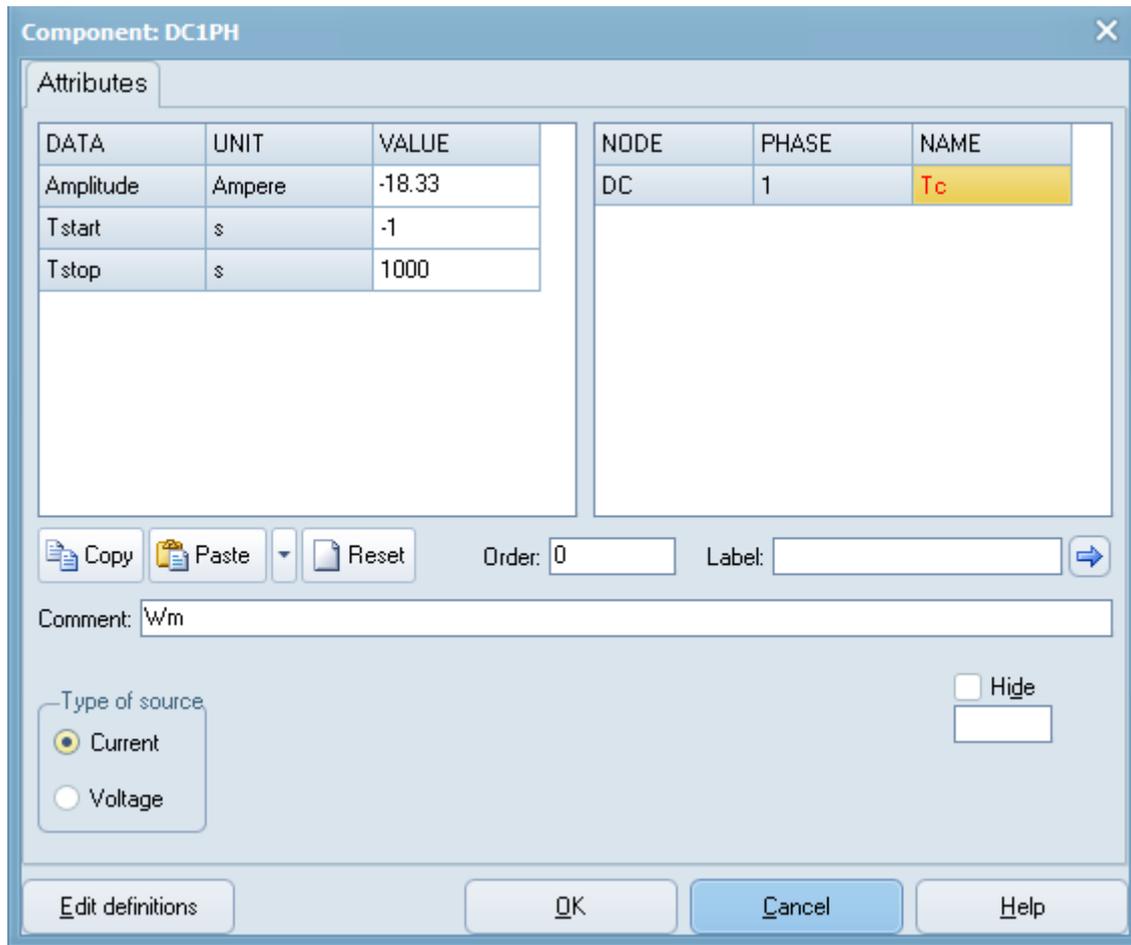
Figura 40 – Parâmetros de simulação no ATPDraw

delta T:	1E-5
Tmax:	1
Xopt:	60
Copt:	60
Epsilon:	0
Frequency:	60

Fonte: Collares (2021).

A Figura 41 apresenta as características da fonte de CC utilizada para representar o torque resistente de carga.

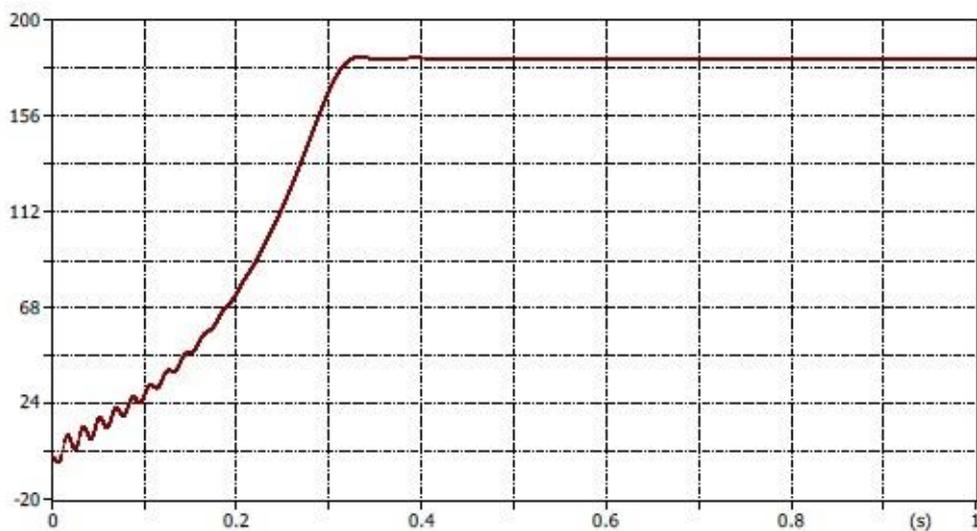
Figura 41 – Parâmetros fonte de corrente, equivalente a carga.



Fonte: Collares (2021).

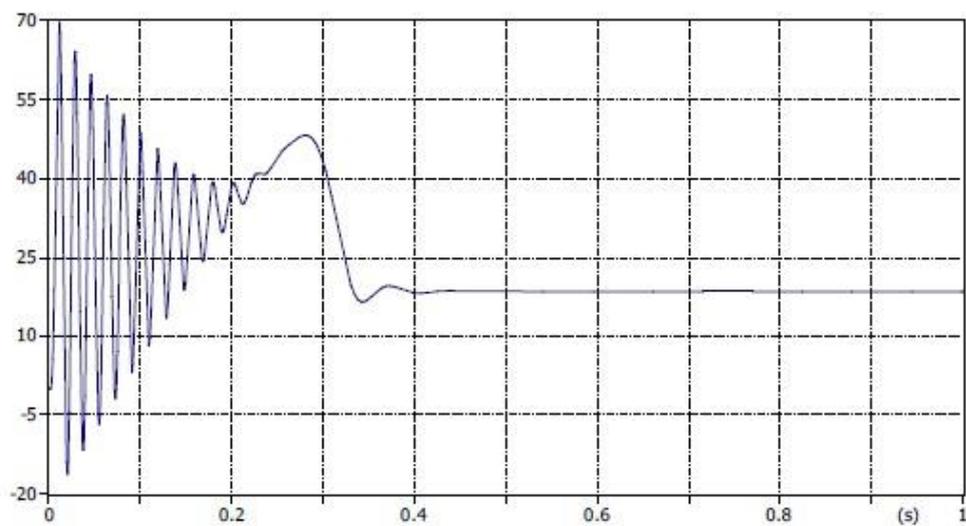
O sinal negativo é utilizado apenas para adequar o gráfico do conjugado. Para que seja visualizado da forma que estamos habituados a trabalhar. Ao analisar o gráfico do torque na Figura 43, verifica-se um valor de 18 N.m quando em regime permanente. Após a execução da simulação do circuito da Figura 39 é observado a velocidade angular pela Figura 42, o torque produzido pela Figura 43 e o conjunto de tensão, potência ativa e corrente no estator pelas Figuras 44, 45 e 46 respectivamente.

Figura 42 – Velocidade angular no ciclo S1



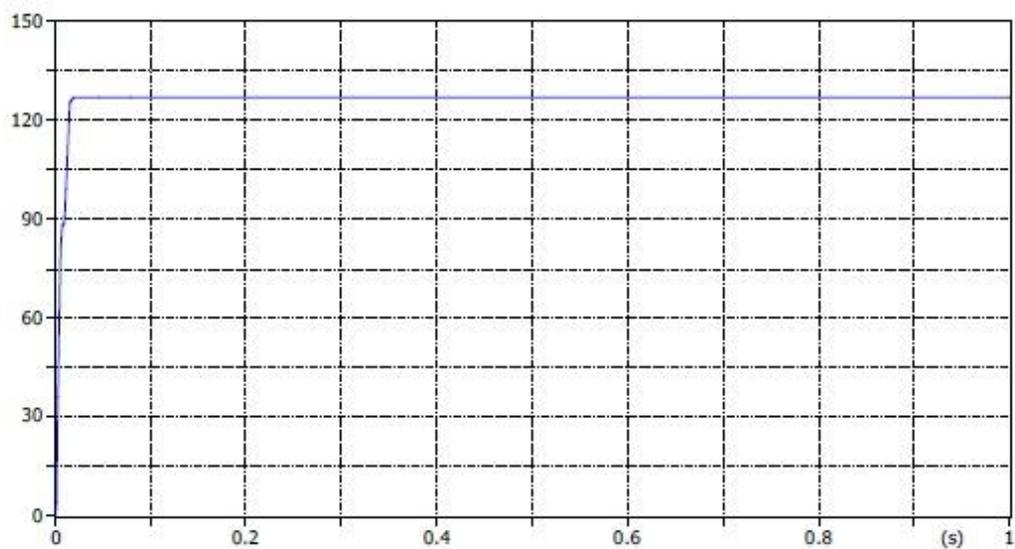
Fonte: Collares (2021).

Figura 43 – Torque no ciclo S1



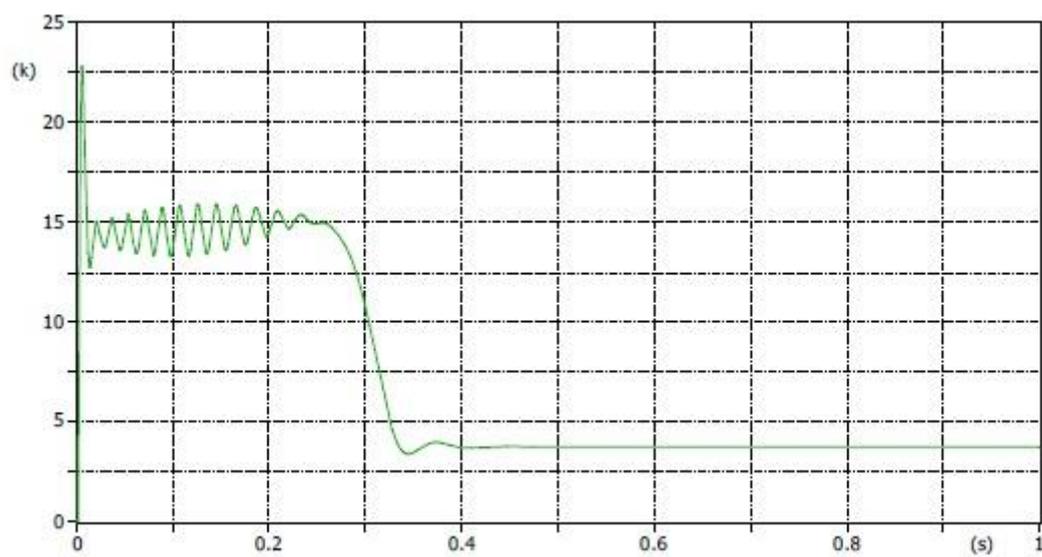
Fonte: Collares (2021).

Figura 44 – Tensão no ciclo S1



Fonte: Collares (2021).

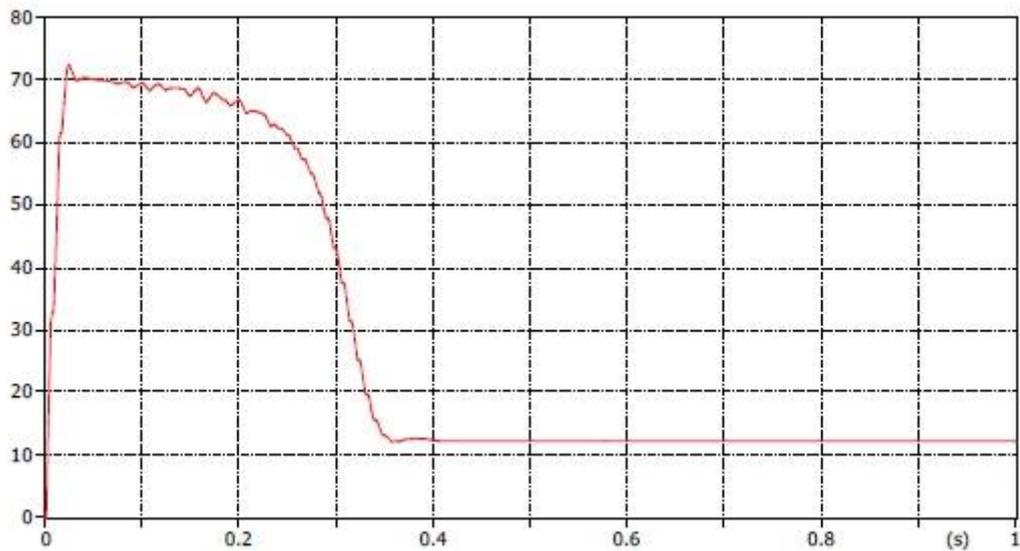
Figura 45 – Potencia no ciclo S1



Fonte:

Fonte: Collares (2021).

Figura 46 – Corrente no ciclo S1



Fonte: Collares (2021).

Verifica-se nas figuras anteriores que o motor passa pela partida após aproximadamente 0,35 segundos. Depois disso, a máquina atinge o regime permanente com uma velocidade angular aproximadamente igual a 185 rad/s e um torque aproximado de 18,33 Nm. Vale ressaltar ainda que a corrente de partida atinge quase 7 vezes o patamar nominal.

4.4.2 Ciclo de operação S2

Este ciclo como mencionado na seção 3.5.2, é dado por um período a plena carga e outro com o motor a vazio. Sendo assim não há período de repouso para o motor. Para tanto foi utilizado o mesmo circuito da Figura 39. Mas, há uma alteração na fonte de CC que, após o período de 0,5 segundos é desenergizada. O tempo de simulação agora compreende o tempo de 0,3 segundos para o motor atingir o regime permanente, seguido de um ciclo de 1 segundo que por sua vez, é dividido em 0,5 segundos a plena carga e 0,5 segundos a vazio. Portanto o período total (T_{max}) de simulação é de 1,3 segundos. A Figura 47 apresenta os parâmetros de simulação no ATPDraw para este cenário de estudos.

Figura 47 – Parâmetros de simulação no ATPDraw

delta T:	1E-5
Tmax:	1.3
Xopt:	60
Copt:	60
Epsilon:	0
Frequency:	60

Fonte: Collares (2021).

A Figura 48 apresenta os parâmetros da fonte de CC que tem o papel de torque de carga. Observa-se que ela é desconectada no tempo de 0,8 segundos (Tstop). Este tempo é referente aos 0,3 segundos que o sistema utiliza para a partida e os 0,5 segundos em regime de plena carga.

Figura 48 – Parâmetros fonte de corrente equivalente a carga

Component: DC1PH

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Ampere	-15.1	DC	1	Tc
Tstart	s	-1			
Tstop	s	0.8			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment: Wm

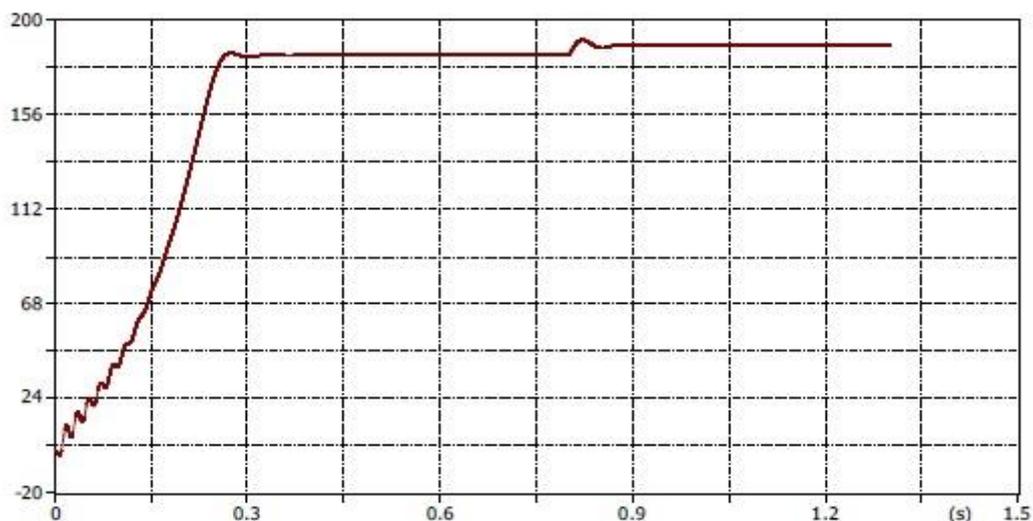
Type of source: Current Voltage Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Collares (2021).

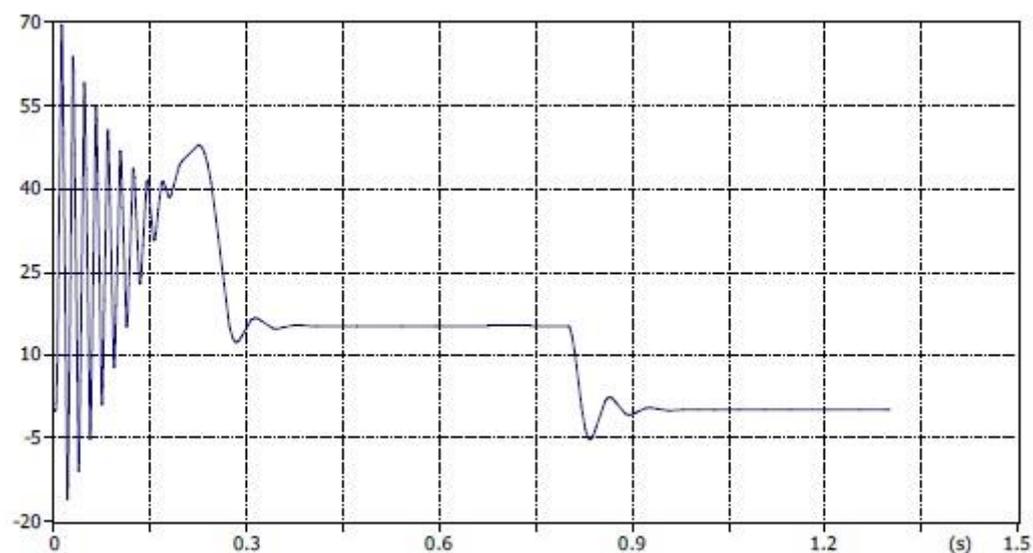
Após a execução da simulação do circuito da Figura 39 é observado a velocidade angular pela Figura 49, o torque produzido pela Figura 50 e o conjunto de tensão, potência ativa e corrente no estator pelas Figuras 51, 52 e 53 respectivamente.

Figura 49 – Velocidade angular do ciclo S2



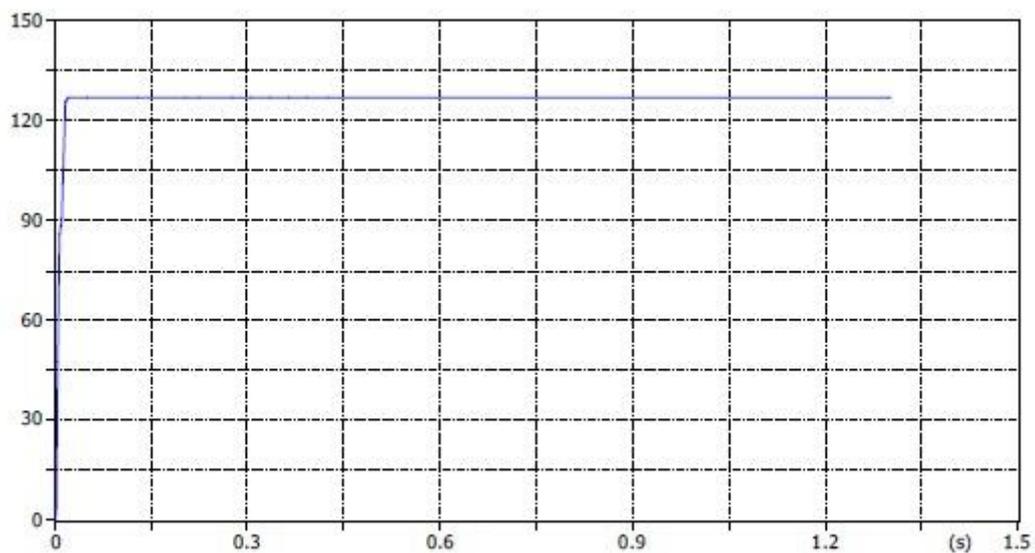
Fonte: Collares (2021).

Figura 50 – Torque do ciclo S2



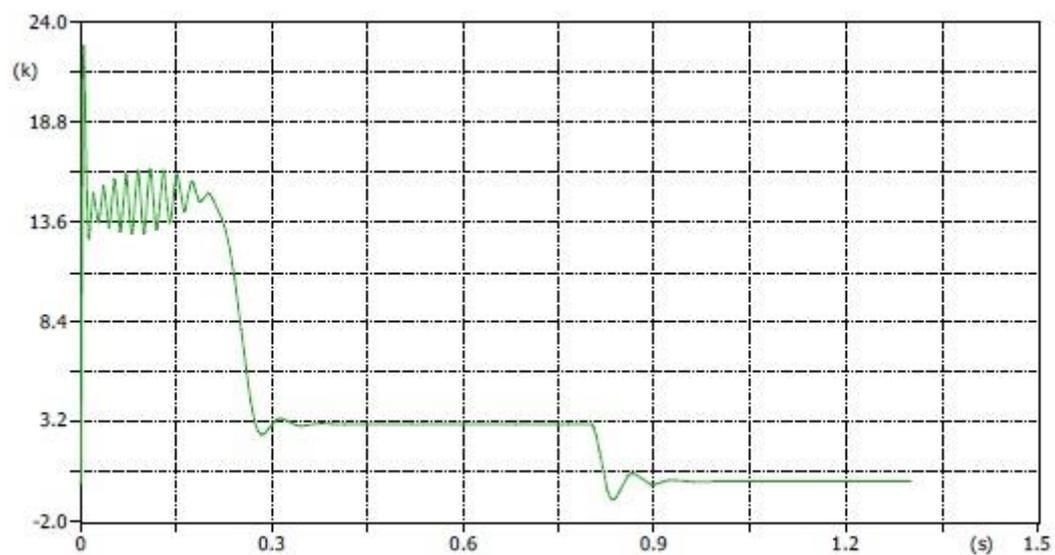
Fonte: Collares (2021).

Figura 51 – Tensão no estator do ciclo S2



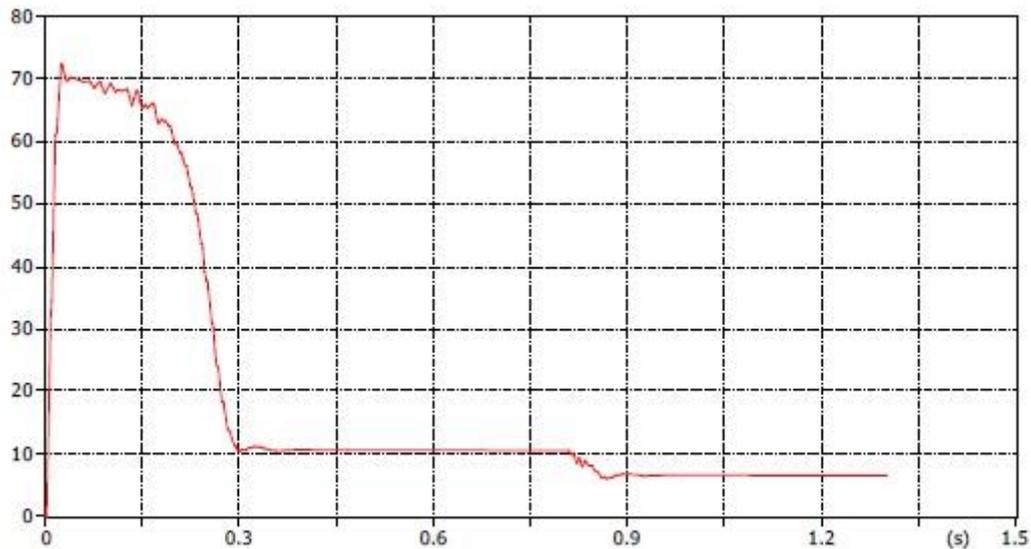
Fonte: Collares (2021).

Figura 52 – Potência do estator do ciclo S2



Fonte: Collares (2021).

Figura 53 – Corrente do estator do ciclo S2



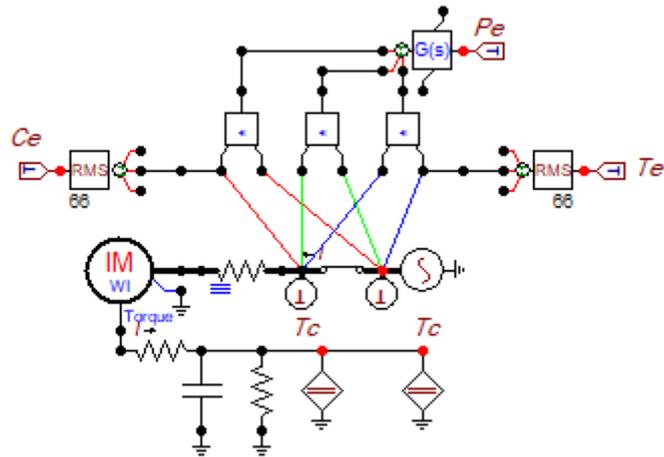
Fonte: Collares (2021).

É válido os mesmos pontos apontados na análise do S1. Aonde temos a corrente de partida e análise até o tempo de 0,8 segundos, onde ocorre um pequeno distúrbio quando a carga é desconectada. Esse tempo de acomodação para a velocidade síncrona que leva menos de 0,1 segundo. Após esse momento de acomodação o motor começa a trabalhar a vazio, com um valor muito próximo de sua velocidade síncrona de aproximadamente 188 rad/s. O torque em regime permanente é igual a aproximadamente 18 Nm. Ao desconectar a carga, há um comportamento transitório que, após finalizado, existe um conjugado praticamente igual a 0 Nm.

4.4.3 Ciclo de operação S3

Para esta simulação, há uma repetição do que foi visto anteriormente para o regime S2. Contudo, uma segunda fonte (torque de carga) é inserida no equivalente mecânico para representar uma nova repetição como ilustra a Figura 54

Figura 54 – Circuito de simulação do ciclo S3



Fonte: Collares (2021).

Como são representados dois ciclos, também é necessário mudar o valor do tempo simulado, A simulação foi realizada com os parâmetros ilustrados na Figura 55:

Figura 55 – Parâmetros de simulação ciclo S3.

delta T:	1E-5
Tmax:	2.3
Xopt:	60
Copt:	60
Epsilon:	0
Frequency:	60

Fonte: Collares (2021).

Para as fontes utilizadas representarem as cargas, a primeira é utilizada os mesmos parâmetros da Figura 48. A segunda carga é adicionada no tempo de 0,5 segundos, quando o motor está a vazio. Logo após, no instante de 1,3 segundos a carga é reinserida no circuito, permanecendo ativa por 0,5 segundos, até o tempo de 1,8 segundos. Assim finaliza-se a simulação do ciclo no instante de 2,3 segundos, simulando o ciclo completo de operação S3 com duas repetições, executando essa simulação, é obtido o gráfico da velocidade angular representado pela Figura 56. O

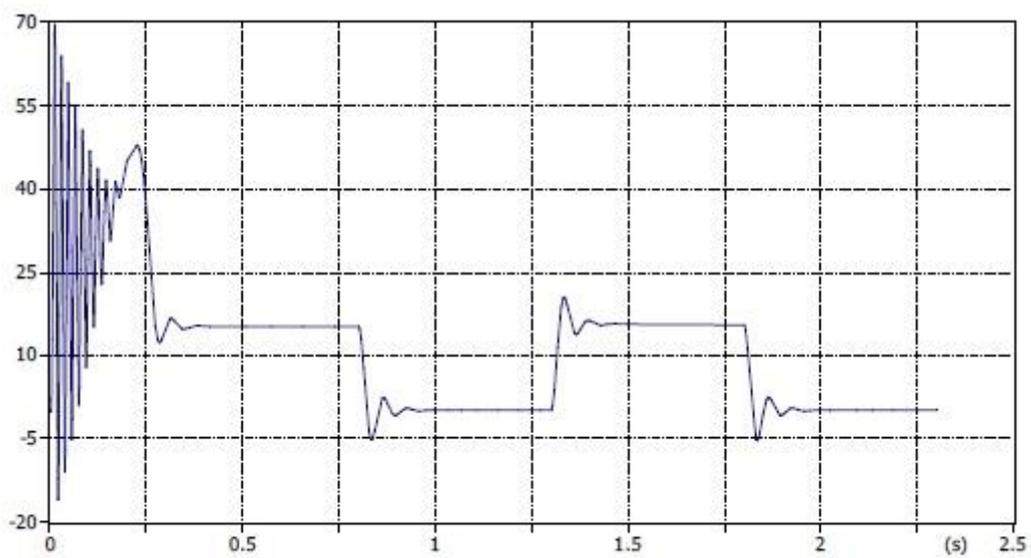
torque produzido pela máquina é apresentado na Figura 57, a tensão, potência ativa e corrente do estator nas Figura 58, 59 e 60, respectivamente.

Figura 56 – Velocidade angular do ciclo S3



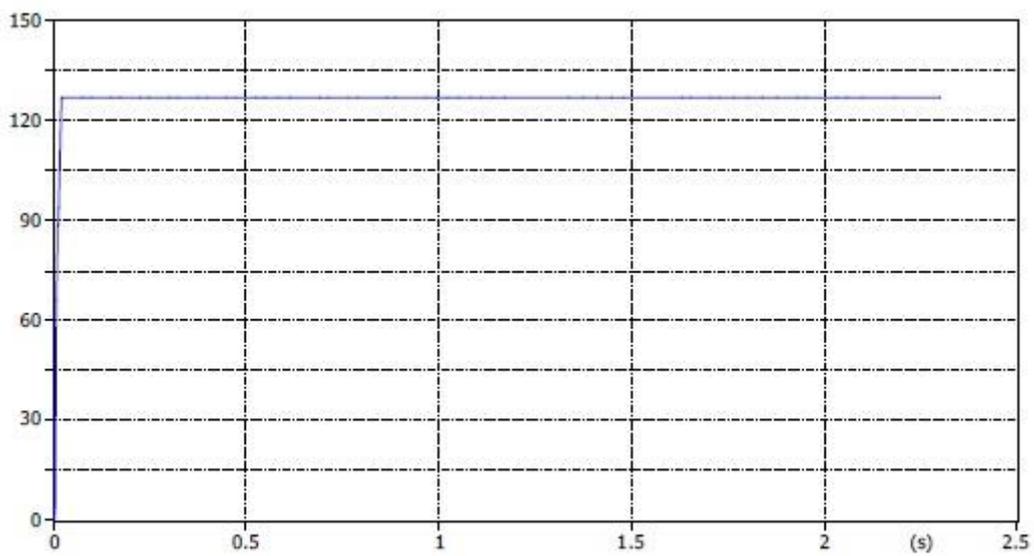
Fonte: Collares (2021).

Figura 57 – Torque do ciclo S3



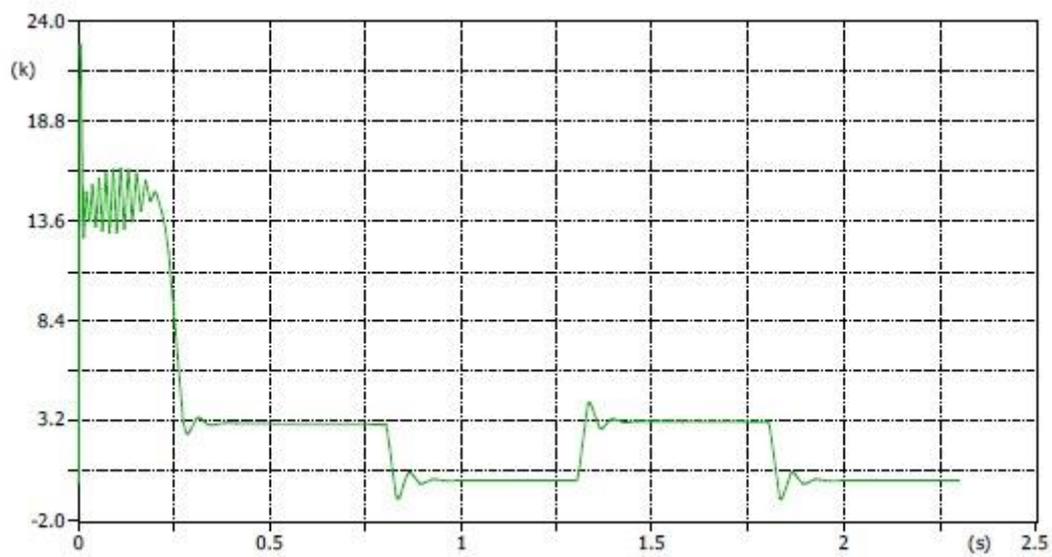
Fonte: Collares (2021).

Figura 58 – Tensão do ciclo S3



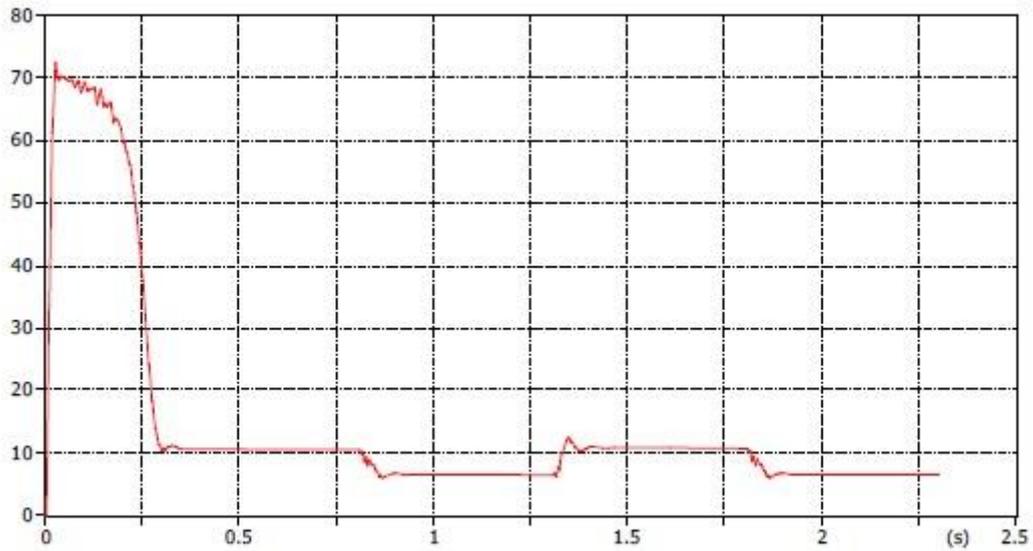
Fonte: Collares (2021).

Figura 59 – Potência do ciclo S3



Fonte: Collares (2021).

Figura 60 – Corrente do ciclo S3



Fonte: Collares (2021).

A análise feita para o ciclo de operação S3 é em algumas partes igual ao que foi exposto para o ciclo S2. Mas existe uma repetição do acionamento da carga por duas vezes. Assim a máquina passa por 2 períodos de trabalho a plena carga, cada um seguido por um período a vazio e sem repouso entre um período e outro. Em relação ao torque, é possível constatar que varia durante o regime permanente entre 18 Nm quando a plena carga e 0 Nm quando a vazio, tendo distúrbios transitórios que duram menos de 0,1 segundo nos momentos em que se acopla e desacopla a carga.

5 CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) teve como objetivo apresentar a simulação e a interpretação de resultados dos ciclos de operações de motores de indução utilizando o EMTP-ATP e o ATPDraw. Com base na investigação realizada foi constatado que é possível realizar as simulações no EMTP-ATP e no ATPDraw. Isso permite estudos mais avançados sobre motores de indução trifásicos nessas ferramentas computacionais.

Como trabalhos futuros espera-se modelar esquemas de partida de motores no EMTP-ATP e no ATPDraw, assim como estabelecer comparações com dados experimentais.

6 BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS NBR 17094: 2013: Máquinas elétricas girantes: Motor de indução trifásico. Rio de Janeiro: ABNT,2013. 77p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7094:2003 : Máquinas elétricas girantes - Motores de indução – Especificação. Rio de Janeiro ABNT,2003. 49p.

CEFETES, MOTORES DE INDUÇÃO, Prof. Marcio Có. Disponível em <http://www.elebrar.com.br/wp-content/uploads/2018/02/motores_de_inducao.pdf>

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª edição – Porto Alegre: AMGH.2013.

DOMMEL, H. W. et al. **Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)**. Inglês (Estados Unidos): Bonneville Power Administration, 1992

FRANCISCO, António M.S., **Motores de Indução Trifásicos**, versão 0, 01/06

HØIDALEN, H. K. **ATPDraw – Graphical Preprocessor to EMTP/ATP (6.2)**. Noruega: Norges Teknisk- Naturvitenskapelige Universitet (NTNU), 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, **Curso de ATPDraw**, Uberlândia-MG, 2012. 230 p.

WEG S.A. **Motores elétricos: guia de especificação**. Grupo Weg. Jaragua do Sul. 2012.

WENGERKIEVICZ, Carlos A.C. et al, **Estimation of Three-Phase Induction Motor Equivalent Circuito Parameters from Manufacturer Catalog Data**, Journal of Microwaves, Optoelectronics and Eletromagnetic Applications, Vol. 16, No1, Março 2017