Victor Eberhardt Menegon

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE DIFERENTES TIPOS DE CONTROLE PARA MSIP**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Lobo Heldwein

Coorientador: Eng. Ms. Claudio Eduardo Soares

Florianópolis

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor

através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

|  |
| --- |
|  |
| A ficha de identificação é elaborada pelo próprio autor  Maiores informações em:  <http://portal.bu.ufsc.br/servicos/ficha-de-identificacao-da-obra/> |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |

Victor Eberhardt Menegon

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE DIFERENTES TIPOS DE CONTROLE PARA MSIP**

Esta Trabalho foi julgada adequada para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica/Eletrônica e aprovada em sua forma final pela Banca Examinadora

Local, x de junho de 2018.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof. xxx, Dr.

Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof. º Marcelo Lobo Heldwein, Dr. º

Orientador

Universidade UFSC

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Eng.º Claudio Eduardo Soares, Ms. º

Corientador

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof. xxxx, Dr.

Universidade xxxxxx

Dedico este trabalho a Deus, minha família e minha namorada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus por sempre me ajudar e me capacitar. Agradeço aos meus pais, Ana e Nilson, por sempre batalharem para que eu tivesse a melhor educação e a minha namorada, Carina, por todo o apoio e amor. Agradeço ao Professor Marcelo Lobo Heldwein por permitir a execução deste trabalho no meu estágio e me orientar da melhor maneira possível. Agradeço ao meu orientador de estágio Cláudio Eduardo Soares pela paciência e todos os ensinamentos transmitidos. Agradeço por fim ao meu chefe Alexandre Cabral e a Embraco por me darem a oportunidade de fazer um estágio de 1 ano e meio e ainda fazer este trabalho de conclusão de curso nas instalações da empresa.

Texto da Epígrafe. Citação relativa ao tema do trabalho. É opcional. A epígrafe pode também aparecer na abertura de cada seção ou capítulo.

(Autor da epígrafe, ano)

RESUMO

O texto do resumo deve ser digitado, em um único bloco, sem espaço de parágrafo. O resumo deve ser significativo, composto de uma sequência de frases concisas, afirmativas, e não de uma enumeração de tópicos. Não deve conter citações. Deve-se usar o verbo na voz ativa. Abaixo do resumo, deve-se informar as palavras-chave (palavras ou expressões significativas retiradas do texto) ou termos retirados de thesaurus da área.

**Palavras-chave:** Palavra-chave 1. Palavra-chave 2. Palavra-chave 3.

ABSTRACT

Resumo traduzido para outros idiomas, neste caso, inglês. Segue o formato do resumo feito na língua vernácula. As palavras-chave traduzidas, versão em língua estrangeira, são colocadas abaixo do texto precedidas pela expressão “Keywords”, separadas por ponto.

**Keywords:** Keyword 1. Keyword 2. Keyword 3.

LISTA DE FIGURAS

[Figura 1. (a) *BEMF* trapezoidal. (b) *BEMF* senoidal. 30](#_Toc511835820)

[Figura 2. *BLDC* com 4 polos e ímãs superficiais 30](#_Toc511835821)

[Figura 3. Circuito Elétrico de um motor *BLDC* 32](#_Toc511835822)

[Figura 4. Diagrama de forças atuantes no rotor 34](#_Toc511835823)

[Figura 5. Representação de *IGBT* com diodo de roda-livre. 35](#_Toc511835824)

LISTA DE QUADROS

[Quadro 1 - Formatação do texto 30](#_Toc447824501)

LISTA DE TABELAS

[Tabela 1. Parâmetros do motor utilizado 30](#_Toc511835909)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

*DC* - Corrente Direta (*Direct Current*)

MSIP - Motor Síncrono de Ímãs Permanentes

*BEMF* - Força Contra Eletromotriz (*Back Electromotive Force*)

*BLAC* - Motor de Corrente Alternada Sem Escovas (*Brushless Alternate Current*)

*BLDC -* Motor de Corrente Contínua Sem Escovas(*Brushless Direct Current*)

*IGBT*  - *Insulated Gate Bipolar Transistor*

SUMÁRIO

[1 INTRODUÇÃO 27](#_Toc511835989)

[1.1 OBJETIVOS 28](#_Toc511835990)

[1.1.1 Objetivo geral 28](#_Toc511835991)

[1.1.2 Objetivos específicos 28](#_Toc511835992)

[2 MOTORES SÍNCRONOS 29](#_Toc511835993)

[2.1 Motores Síncronos de Ímãs Permanentes 29](#_Toc511835994)

[2.2 Modelo Matemático MSIP *BLDC* 31](#_Toc511835995)

[2.2.1 Equações Elétricas 31](#_Toc511835996)

[2.2.2 Equações Mecânicas 33](#_Toc511835997)

[2.3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA 34](#_Toc511835998)

[2.4 PERDAS 34](#_Toc511835999)

[2.4.1 Perdas no Inversor 35](#_Toc511836000)

[2.4.1.1 Perdas por Condução 35](#_Toc511836001)

[2.4.1.2 Perdas por Comutação 35](#_Toc511836002)

[2.4.2 Perdas no Motor 35](#_Toc511836003)

[3 TIPOS DE CONTROLE 35](#_Toc511836004)

[3.1 Condição de Máxima Eficiência 36](#_Toc511836005)

[3.2 Controle Trapezoidal 36](#_Toc511836006)

[3.3 Controle Vetorial 36](#_Toc511836007)

[3.3.1 Transformada de Clarke 36](#_Toc511836008)

[3.3.2 Transformada de Park 36](#_Toc511836009)

[3.3.3 Modelo do Motor no Referencial Síncrono 36](#_Toc511836010)

[3.3.4 Modulações para Controle Vetorial 36](#_Toc511836011)

[3.3.4.1 Senoidal 36](#_Toc511836012)

[3.3.4.2 Space Vector Modulation 36](#_Toc511836013)

[4 Modelo MatLAB 36](#_Toc511836014)

[4.1 Controle Trapezoidal 36](#_Toc511836015)

[4.1.1 Condições de Contorno 36](#_Toc511836016)

[4.1.2 Cálculo do Controlador 36](#_Toc511836017)

[4.1.3 Simulações 36](#_Toc511836018)

[4.2 Controle Vetorial 36](#_Toc511836019)

[4.2.1 Condições de Contorno 36](#_Toc511836020)

[4.2.2 Cálculo dos Controladores 36](#_Toc511836021)

[4.2.3 Simulações 36](#_Toc511836022)

[5 Controladores Digitais 36](#_Toc511836023)

[5.1 Controle Trapezoidal 36](#_Toc511836024)

[5.2 Controle Vetorial 37](#_Toc511836025)

[6 RESULTADOS 37](#_Toc511836026)

[6.1 Dinamômetro 37](#_Toc511836027)

[6.2 Condições de Contorno dos Testes 37](#_Toc511836028)

[6.3 Resultados 37](#_Toc511836029)

[7 CONCLUSÃO 37](#_Toc511836030)

[REFERÊNCIAS 39](#_Toc511836031)

[APÊNDICE A – Descrição 41](#_Toc511836032)

[ANEXO A – Descrição 43](#_Toc511836033)

# INTRODUÇÃO

Dentre os pontos mais relevantes para a criação de um produto na indústria, estão a eficiência e o custo, podendo-se priorizar um destes ou então buscar o ponto ótimo entre ambos. Seguindo esta linha de raciocínio, normalmente utiliza-se de motores síncronos de ímãs permanentes (MSIP) para compressores herméticos da linha branca. A crescente utilização deste tipo de motor e não os motores DC (do inglês *Direct Curent*) na indústria se dão por diversos motivos. Segundo Fitzgerald, Kingsley e Umans (2003) a substituição dos enrolamentos de campo por ímãs permanentes, facilita e reduz a construção da máquina elétrica. Porém a principal vantagem está no fato de a máquina não precisar de fonte de excitação externa para criar campo magnético e, assim, reduz-se também perdas (KRISHNAN, 2010) e (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003).

Outro fator importante é a ausência de escovas para providenciar a comutação das fases, como em um motor *DC* comum. Com isso, o motor possui uma vida útil maior, visto que não há mais a necessidade da manutenção de escovas, as quais podem produzir faíscas e aumentar a temperatura do motor. Porém como a comutação não é mais feita por escovas, faz-se necessário o uso de inversores e técnicas de controle e acionamento para que o motor possa funcionar corretamente.

No capítulo 1 do desenvolvimento serão abordadas as características do motor a ser utilizado como objeto de estudo neste trabalho de conclusão do curso, tão bem quanto as diversas perdas no motor e no inversor. No capítulo 2 serão discutidas as técnicas de controle Trapezoidal e Vetorial, revisitando o estado da arte e as operações matemáticas necessárias. Já no capítulo 3, os cálculos e considerações para todos os controladores serão explicados. No capítulo 4 será detalhada a modelagem do motor, inversor e controlador no MatLAB e os resultados obtidos das simulações. Por fim, o capítulo 5 conterá os resultados obtidos nos dinamômetros disponibilizados para uso deste trabalho de conclusão de curso.

## OBJETIVOS

### Objetivo geral

Estudo de motores MSIP aplicados a indústria de linha branca, tanto quanto análise de diferentes técnicas de controle e acionamento quanto a eficiência.

### Objetivos específicos

Analisar a eficiência do conjunto motor-inversor para cada tipo de controle estudado e concluir qual a melhor estratégia para tal sistema em uma determinada condição de contorno.

# MOTORES SÍNCRONOS

Máquinas síncronas são utilizadas para diversas aplicações, tanto como geradores, como motores. Elas possuem tradicionalmente um enrolamento um de campo, além do de armadura. Por tal motivo, faz-se necessário o uso de uma fonte de excitação *DC*, a qual criará um campo magnético com o auxílio de escovas para comutação. A interação de tal campo com o campo girante gerado pelo enrolamento de armadura, faz com que o rotor possua velocidade proporcional à frequência da corrente na armadura do motor em regime permanente. No entanto, a utilização de escovas pode aumentar a temperatura do motor e causar faiscamento, o enrolamento de campo utiliza um grande espaço e provoca perdas adicionais nos fios de cobre que compõem o enrolamento. Para eliminar tais problemas e a utilização de uma fonte de excitação, a indústria utiliza como solução motores síncronos de ímãs permanentes (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003).

## Motores Síncronos de Ímãs Permanentes

Segundo Krishnan (2010), os ímãs permanentes foram introduzidos em pesquisas relacionadas a máquinas elétricas na década de 50 e rapidamente os materiais utilizados tiveram uma melhora na sua qualidade. Os materiais mais utilizados atualmente são o ferrite, ligas de ferro (AlNiCo) e de terras raras (SmCo, NdFeb), em que os quesitos para escolha dependem da prioridade do projeto, seja ele o custo ou o alto desempenho (NAZÁRIO, 2014).

Além de eliminar o uso de uma fonte externa de excitação, o uso de ímãs permanentes traz como vantagem a redução do tamanho do motor em comparação ao que possui enrolamentos de campo, porque o ímã possui maior densidade de energia do que o citado anteriormente (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003). O controle dos MSIPs é feito através da utilização de inversores de frequência, a fim de que a corrente no estator possa ter frequências variáveis.

O MSIP pode ser construído com diferentes disposições de ímãs o que acarreta em um diferente tipo de *BEMF*. Essa diferença é utilizada para caracterizar o tipo do MSIP, como por exemplo em *BLDC* e em *BLAC*. O primeiro tem como característica uma *BEMF* trapezoidal e o segundo, uma senoidal, como pode ser visto na Figura 1. Neste trabalho será utilizado um motor do tipo *BLDC* para fazer o estudo de caso. Este possui rotor interno de 4 polos e ímãs superficiais, como pode ser visto na Figura 2. Os principais parâmetros deste motor estão descritos na Tabela 1.

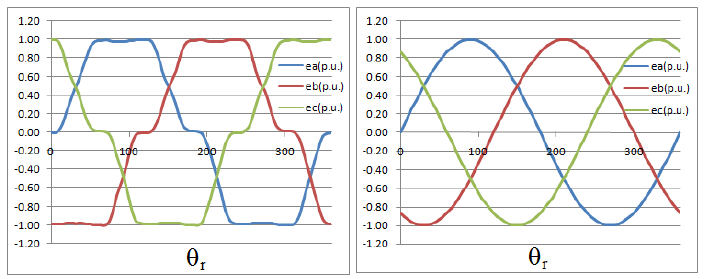
 (a) (b)

Figura 1. (a) *BEMF* trapezoidal. (b) *BEMF* senoidal. (ANDRICH,2013)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

Tabela 1. Parâmetros do motor utilizado

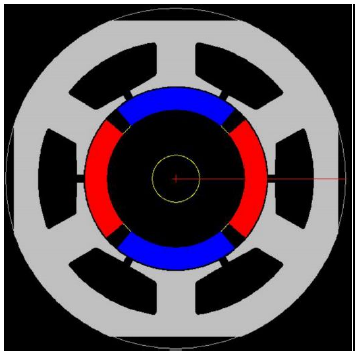


Figura 2. *BLDC* com 4 polos e ímãs superficiais

O rotor com ímãs superficiais possui como característica o preenchimento com ar entre os ímãs adjacentes. Como o ímã possui permeabilidade magnética muito próxima à do ar, não há variação da indutância em função da posição do rotor, fazendo com que não haja torque de relutância no motor (ANDRICH, 2013).

## Modelo Matemático MSIP *BLDC*

O modelo matemático do motor *BLDC* foi deduzido, segundo Krishnan (2010), em tensões e correntes de fase. A dedução deste modelo leva em consideração algumas características, são elas:

* As fases do estator são simétricas e balanceadas;
* Correntes induzidas no rotor causadas por componentes harmônicas no estator são desconsideradas;
* Perdas no ferro e por dispersão são desconsideradas;
* A distância angular entre os ímãs é desconsiderada;
* Os polos do rotor são lisos e superficiais.

### Equações Elétricas

O circuito elétrico do motor pode ser visto na Figura 3, em que as tensões de fase são:

(Eq. 1)

Onde é a fase.

Ao se considerar o sistema completo com as três fases, tem-se o sistema:

(Eq. 2)

Em que:

são as tensões fase-neutro do motor [V];

são as resistências de cada fase, como o motor é balanceado, as três são iguais [Ω];

são as indutâncias próprias e mútuas de cada fase [H];

são as forças contra eletromotriz de cada fase [V].

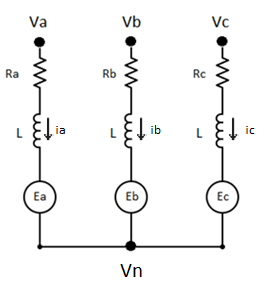


Figura 3. Circuito Elétrico de um motor *BLDC*

As *BEMFs* podem ser descritas em função da velocidade angular ω e da constante de fluxo (CHIASSON, 2005) e (KRISHNAN, 2010), como pode ser visto na equação abaixo.

(Eq. 3)

(Eq. 4)

Em que:

é o ângulo do rotor em relação à origem [rad];

é uma função normalizada que descreve o caráter trapezoidal da *BEMF* de um motor *BLDC.*

Como dito anteriormente, o fato de o rotor possuir ímãs superficiais, não havendo variação na indutância em função da posição do rotor e as três fases serem balanceadas, segundo Krishnan (2010), as indutâncias mútuas são consideradas iguais entre elas e a indutância própria é igual entre as três fases. Portanto, o sistema pode ser simplificado para:

(Eq. 5)

Onde:

são as indutâncias próprias;

são as indutâncias mútuas.

Pode-se perceber ainda que como o sistema é balanceado, o somatório das correntes é nulo, levando o sistema a mais uma simplificação, resultando na forma final da Eq. 6 (KRISHNAN, 2010), (ANDRICH, 2013) e (NAZÁRIO, 2014).

(Eq. 6)

(Eq. 7)

Como não há torque de relutância neste tipo de motor, o torque eletromagnético pode ser descrito como (ANDRICH, 2013):

(Eq. 8)

Sendo que representa o número de pares de polos.

### Equações Mecânicas

Como pode ser visto na Figura 4, existem três forças atuantes no rotor do motor, de tal forma que se pode descrever o comportamento mecânico do motor, como sendo:

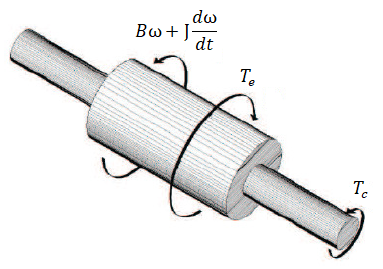


Figura 4. Diagrama de forças atuantes no rotor (NAZÁRIO, 2014)

(Eq. 9)

Em que:

é o coeficiente de atrito viscoso nos acoplamentos do motor ;

representa a constante de inércia do ;

é o torque aplicado pela carga .

Ou seja, o torque eletromagnético não é somente consumido pela carga aplicada ao motor, visto que os acoplamentos e a inércia geram também torque contrário ao eletromagnético, sendo eles torque resultante do atrito viscoso, o qual é dependente da velocidade do motor, e resultante da inércia, o qual é dependente da aceleração do motor.

## INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Com o invento do inversor de frequência, os MSIPs obtiveram maior popularidade. Isso se deve ao fato de que com o inversor é possível variar a frequência e a tensão aplicada no motor para controlar a velocidade de operação. Aplicando técnicas de modulação, pode-se variar estratégias de controle e obter diferentes resultados de eficiência de um mesmo motor. Como já dito anteriormente, este estudo tem como objetivo comparar o controle trapezoidal e o vetorial. Ambos utilizam de modulações diferentes, as quais serão explicadas posteriormente.

## PERDAS

Para o estudo de eficiência é de suma importância o conhecimento de todas as fontes significativas de perdas no sistema. Este, neste objeto de estudo, é composto de um inversor e um motor. Nas subseções a seguir as componentes de perda para cada subsistema serão explicadas.

### Perdas no Inversor

As perdas no inversor são caracterizadas pelo efeito Joule e são divididas em duas, por condução e por comutação. Essas perdas foram modeladas considerando-se a utilização de MOSFETs como chaves. Como pode ser visto na Figura 5, o MOSFET possui um diodo de roda-livre, o qual permite que para cargas RL, exista a circulação de corrente por ele, mesmo quando a chave está aberta. De tal forma que se tenha uma corrente contínua no motor. As perdas citadas anteriormente, serão explicadas e modeladas unicamente com o intuito de se entender melhor as características de cada tipo de controle, elas não serão calculadas analiticamente neste trabalho.

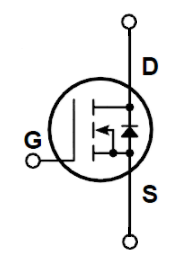


Figura 5. Representação de um MOSFET com diodo de roda-livre

#### Perdas por Condução

Quando o MOSFET conduz, ou seja, está saturado, ele comporta-se como uma resistência, aqui chamada . Este comportamento define qual será as perdas por condução ou a máxima corrente que o condutor suporta (BARBI, 2014). A potência perdida durante a condução do MOSFET pode ser definida então como:

(Eq. 10)

Em que,

é o tempo em que a chave está conduzindo;

é a frequência de chaveamento do inversor;

é a resistência que caracteriza o MOSFET enquanto este conduz;

é a corrente que o MOSFET conduz.

#### Perdas por Comutação

As perdas por comutação são caracterizadas pelo momento de transição entre os estados da chave, em que há extinção ou início da condução de corrente e há início ou extinção da tensão imposta sobre a chave. Isto ocorre, porque não é possível uma transição instantânea de tensão e corrente sobre a chave.

Para melhor entender este fato, pode-se dividir a análise em duas etapas, a de entrada em condução e a de abertura da chave. É importante ressaltar que a análise feita será com fins didáticos e não necessariamente representa a realidade de um chaveamento em carga indutiva.

* Entrada em condução:

A chave está aberta e por isso apresenta uma tensão e corrente igual à zero. Quando o circuito de *gate* é acionado e a chave é acionada, ela começa gradualmente a ser fechada, aumentando também gradualmente a corrente que começa a circular por ela. Como consequência a tensão começa a diminuir. Após um tempo a corrente assume seu valor final e a tensão o valor igual à zero, como pode ser visto na como pode ser visto na parte I da Figura 6.

* Abertura da chave:

A chave está fechada e por isso apresenta tensão igual à zero e corrente igual à . Quando comandada, a chave começa gradualmente a abrir, diminuindo no mesmo passo a corrente até que ela atinja o valor igual à zero, fazendo com que a tensão, a qual também sobe gradativamente, atinja o valor de . O tempo em que a chave demora para abrir e extinguir a corrente é igual à .

De tal forma que, segundo Barbi (2014) e Mazgaj, Rozengal e Szular (2015), as perdas totais devido à comutação são definidas como:

(Eq. 11)

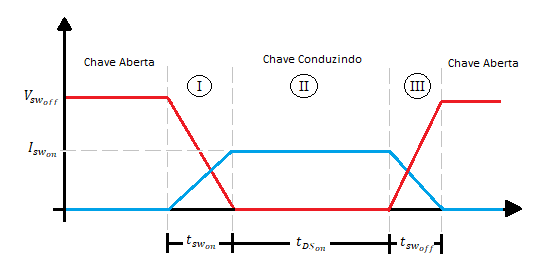


Figura 6. Ilustração de caráter didático para representar os períodos com perdas no Inversor.

### Perdas no Motor

# TIPOS DE CONTROLE

## Condição de Máxima Eficiência

## Controle Trapezoidal

## Controle Vetorial

### Transformada de Clarke

### Transformada de Park

### Modelo do Motor no Referencial Síncrono

### Modulações para Controle Vetorial

#### Senoidal

#### Space Vector Modulation

# Modelo MatLAB

## Controle Trapezoidal

### Condições de Contorno

### Cálculo do Controlador

### Simulações

## Controle Vetorial

### Condições de Contorno

### Cálculo dos Controladores

### Simulações

# Controladores Digitais

## Controle Trapezoidal

## Controle Vetorial

### 

# RESULTADOS

## Dinamômetro

## Condições de Contorno dos Testes

## Resultados

# CONCLUSÃO

As conclusões devem responder às questões da pesquisa, em relação aos objetivos e às hipóteses. Devem ser breves, podendo apresentar recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

###### REFERÊNCIAS

Acesse:

<http://www.more.ufsc.br/>

https://suw.biblos.pk.edu.pl/downloadResource&mId=1615251

###### APÊNDICE A – Descrição

Textos elaborados pelo autor, a fim de completar a sua argumentação. Deve ser precedido da palavra APÊNDICE, identificada por letras maiúsculas consecutivas, travessão e pelo respectivo título. Utilizam-se letras maiúsculas dobradas, quando esgotadas as letras do alfabeto.

Planilha 1 – Modelo A.

|  |  |
| --- | --- |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| rrrrrrrrrrrrrrrrr | eeeeeeeeeeeeeeeee |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| rrrrrrrrrrrrrrrrr | eeeeeeeeeeeeeeeee |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
| rrrrrrrrrrrrrrrrr | eeeeeeeeeeeeeeeee |
| xxxx | yyyyyyyyyyyyyyy |
|  | ttttttttttttttttt |
| rrrrrrrrrrrrrrrrr | eeeeeeeeeeeeeeeee |
| ttttttttttttt |  |
| rrrrrrrrrrrrrrrrr | eeeeeeeeeeeeeeeee |
| rrrrrrrrrrrrrrrrr | eeeeeeeeeeeeeeeee |
|  | gggggggggggggggggg |
| rrrrrrrrrrrrrrrrr | eeeeeeeeeeeeeeeee |
| rrrrrrrrrrrrrrrrr | eeeeeeeeeeeeeeeee |
| rrrrrrrrrrrrrrrrr | eeeeeeeeeeeeeeeee |
| rrrrrrrrrrrrrrrrr | eeeeeeeeeeeeeeeee |
| rrrrrrrrrrrrrrrrr | eeeeeeeeeeeeeeeee |

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

###### ANEXO A – Descrição

São documentos não elaborados pelo autor, que servem de fundamentação (mapas, leis, estatutos). Deve ser precedido da palavra ANEXO, identificada por letras maiúsculas consecutivas, travessão e pelo respectivo título. Utilizam-se letras maiúsculas dobradas, quando esgotadas as letras do alfabeto.