

## 2 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR DE CORRENTE CONTINUA

### 2.1 - A FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA

O princípio de funcionamento do gerador de corrente contínua tem por base a Lei de Faraday que estabelece que, se o fluxo magnético ( $\Phi$ ) que envolve uma determinada espira, varia no tempo, resultará nesta espira uma força eletromotriz induzida ( $e$ ), cujo valor será proporcional à intensidade do fluxo e à taxa de variação do mesmo, conforme está mostrado na equação a seguir:

$$e = A \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

onde:

A - Constante de proporcionalidade;

$d\phi / dt$  - Taxa de variação do fluxo.

A indução desta força eletromotriz (FEM) na espira vai resultar na circulação de uma corrente, desde que o circuito esteja fechado, conforme está mostrado na figura 5 a seguir.

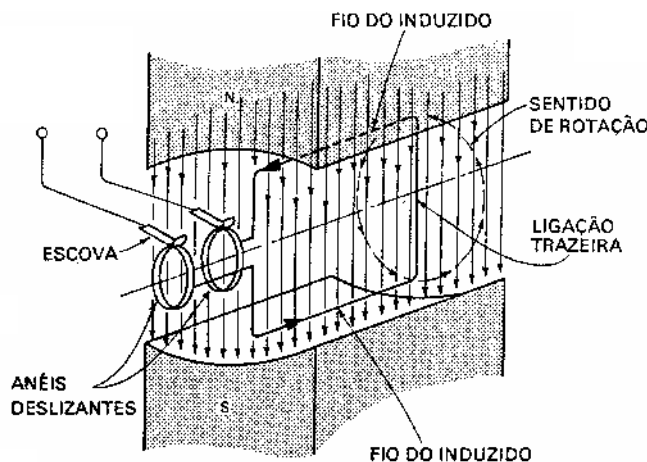
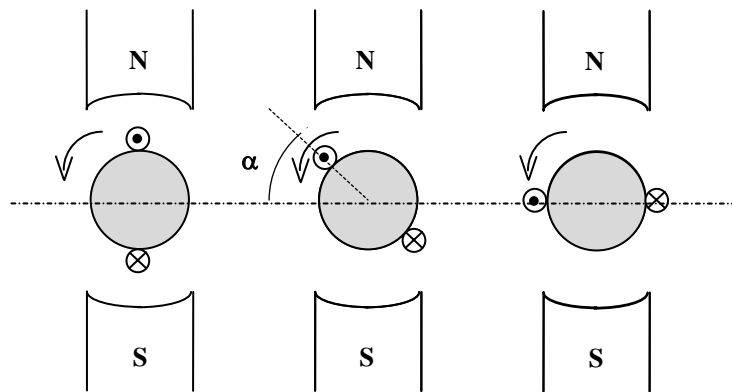


Figura 5 - Geração de FEM em uma espira

O fluxo magnético em máquinas de corrente contínua é produzido nos pólos que estão localizados na parte estática (carcaça) mantendo-se desta forma sua direção fixa. A alteração de sua intensidade e sentido é conseguida com a mudança da corrente de campo, o que se presta a modificar e/ou corrigir as condições operacionais. Deste modo, para a análise do funcionamento do Gerador de Corrente Contínua, pode-se considerá-lo constante. Sua variação em relação à espira é conseguida imprimindo-se uma velocidade (giro) à espira.

A figura 6 mostra a espira em várias posições em relação ao fluxo principal.



**Figura 6 - Espira na armadura movendo-se em relação ao campo.**

Se a espira está movendo-se com  $n$  [rpm], o fluxo principal em relação a espira vai variar conforme a expressão:

$$\varphi = \Phi \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot t\right) \quad (7)$$

onde:

$\Phi$  - valor máximo do fluxo

$n \cdot t$  - posição ocupada pela espira num instante qualquer, determinada pelo ângulo  $\alpha$ .

Neste caso, a FEM induzida na espira é dada por:

$$e = A \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

ou:

$$e = A \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot \Phi \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{60} \cdot nt\right) \quad (8)$$

ou seja, a FEM induzida tem forma de onda senoidal no tempo.

Isto implica que a corrente produzida por esta FEM também será alternada.

Para o caso em análise, onde está considerando-se a presença de apenas uma espira, para que a corrente vista alternada (senoidal) tenha um único sentido de circulação no circuito externo, é necessária a utilização de um único anel ao invés de dois anéis. Este anel deve ser cortado ao meio e cada uma das partes resultantes deve ser isolada eletricamente da outra. Desta forma, obtém-se a construção indicada na figura 7.

Conforme pode-se verificar nesta figura, a corrente no circuito externo terá um único sentido de circulação. O anel de comutação foi denominado por comutador. A forma de onda obtida no circuito externo para a FEM ( $e$ ) está indicada na figura 8.

Se ao invés de apenas uma única espira, instalar-se várias espiras sobre a armadura, defasadas geometricamente de modo conveniente e conectadas aos anéis comutadores de forma a comporem suas FEM (ligadas em série), obtém-se como resultado uma tensão cuja magnitude é a soma dos valores instantâneos das FEM induzidas nas espiras.

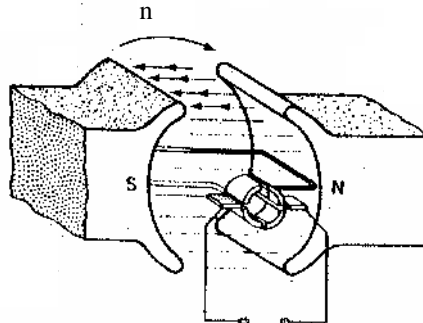


Figura 7 - Comutação de uma espira.

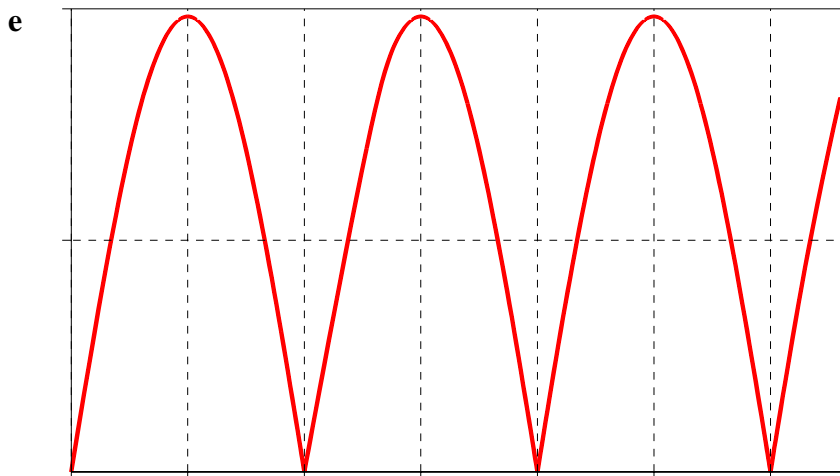


Figura 8 - FEM obtida no circuito externo.

Na figura 9, a seguir, está representado um gerador de quatro espiras. A força eletromotriz resultante está mostrada na figura 10.

Como pode ser observado na figura 10, a força eletromotriz gerada já não mais toca o eixo das abscissas, ou seja, seu valor instantâneo está mais próximo do valor médio. Pode-se então concluir que um aumento no número de espiras, implica em uma maior aproximação entre os valores médio e máximo da FEM resultante.

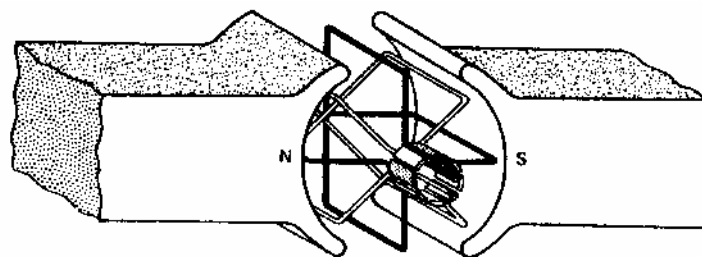
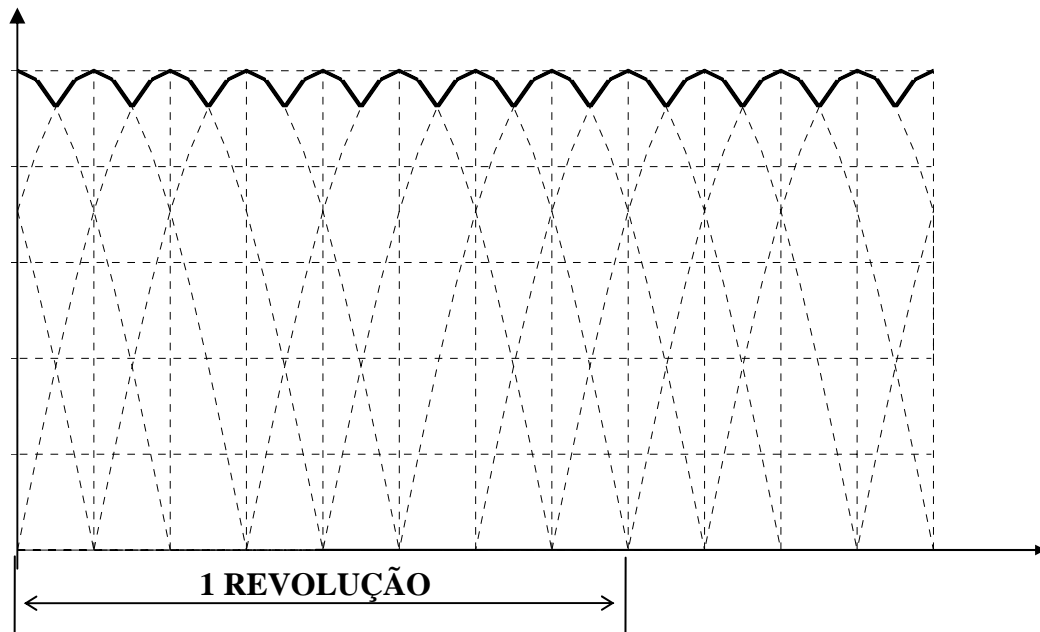


Figura 9 - Gerador com 4 espiras na armadura.



**Figura 10 - FEM resultante.**

O valor médio da FEM induzida em cada espira será dado pela expressão indicada a seguir:

$$E = C_2 \cdot \Phi \cdot n \quad (9)$$

onde:

- E - valor médio da FEM induzida
- $C_2$  - constante de proporcionalidade
- $\Phi$  - fluxo magnético
- n - velocidade da armadura

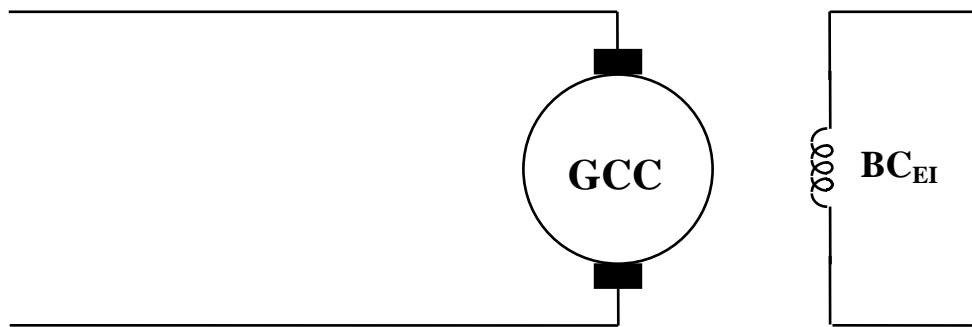
## **2.2 - TIPOS DE GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA**

Dependendo da aplicação prevista para um gerador de corrente contínua, é desejável que apresente uma determinada resposta relativa à tensão terminal correspondente à uma condição operacional definida. Esta diferenciação é basicamente determinada pela forma de excitação, ou seja, pelo modo como o fluxo principal é produzido. A seguir serão mostrados cada um dos tipos de geradores.

### **2.2.1 - GERADOR COM EXCITAÇÃO INDEPENDENTE**

A figura 11 mostra o diagrama básico de um gerador de corrente contínua com excitação independente.

Este tipo de gerador, apresenta como característica própria possuir o circuito de excitação totalmente independente do circuito de armadura. Desta forma, a tensão de alimentação do circuito de campo deve ser estabelecida por uma fonte externa ao gerador.



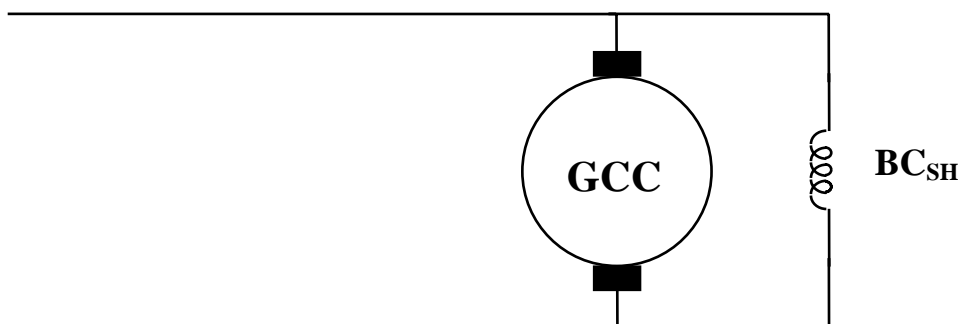
**Figura 11 - Gerador com excitação independente.**

### 2.2.2 - GERADOR COM EXCITAÇÃO EM DERIVAÇÃO (SHUNT)

No gerador com excitação em derivação o enrolamento de excitação é ligado em paralelo com o circuito de armadura, de modo que a própria tensão de armadura é aplicada no enrolamento de campo.

Como neste caso a excitação da máquina é obtida da força eletromotriz gerada, que no início do processo apresenta-se bastante reduzida, sendo resultado apenas da ação do magnetismo residual, deve-se tomar o cuidado que nesta fase o gerador esteja operando, preferencialmente em vazio, ou em uma condição tal que a carga seja suficientemente pequena de modo a não interferir no processo.

A figura 12 mostra um gerador com excitação em derivação.

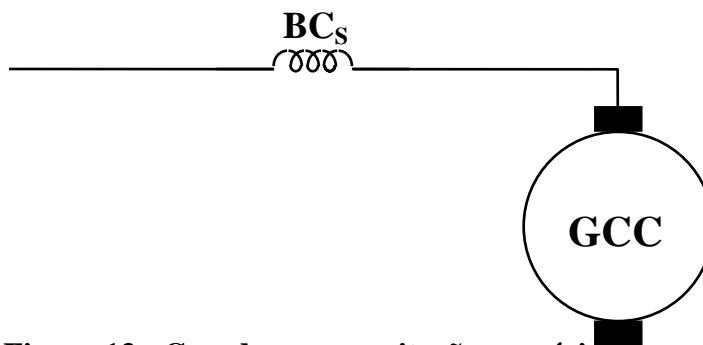


**Figura 12 - Gerador com excitação em derivação.**

### 2.2.3 - GERADOR COM EXCITAÇÃO EM SÉRIE

Neste caso, o circuito de excitação é colocado em série com o circuito de armadura, de modo que a corrente de excitação é a própria corrente de carga.

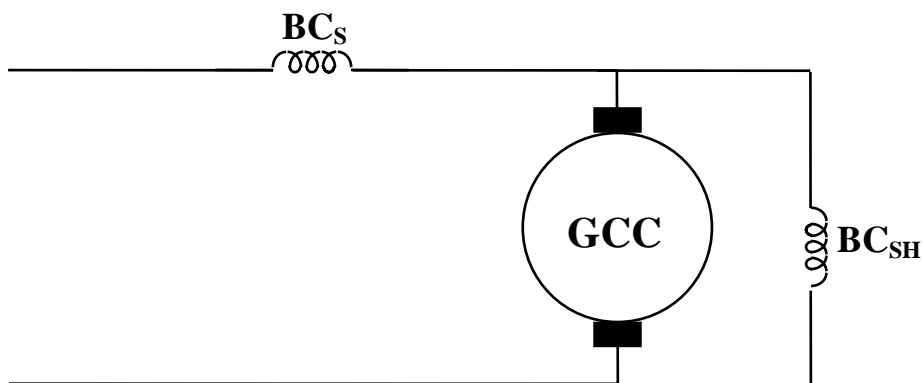
O esquema básico de um gerador com excitação série está indicado na figura 13.



**Figura 13 - Gerador com excitação em série.**

### 2.2.4 - GERADOR COM EXCITAÇÃO COMPOSTA (COMPOUND)

Estes geradores possuem tanto os enrolamentos de excitação série ( $B_{CS}$ ), bem como os de excitação paralela ( $B_{CP}$ ), conforme está mostrado na figura 14.



**Figura 14 - Gerador com excitação composta.**

### 2.3 - EQUAÇÕES BÁSICAS DO GERADOR

Na figura 15, a seguir, está representado o circuito equivalente de um gerador de corrente contínua com excitação independente, que é o tipo de excitação mais usualmente utilizada na indústria.

A aplicação da tensão  $U_E$  no circuito de excitação da máquina, tem como consequência a circulação da corrente de excitação  $I_E$ , definida pela equação:

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} \quad (10)$$

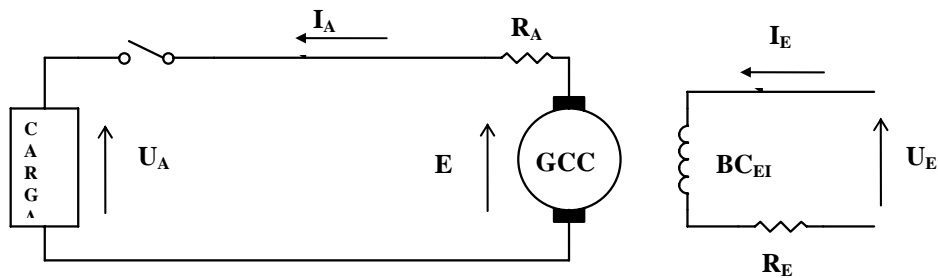
onde:

$U_E$  - tensão de excitação [V]

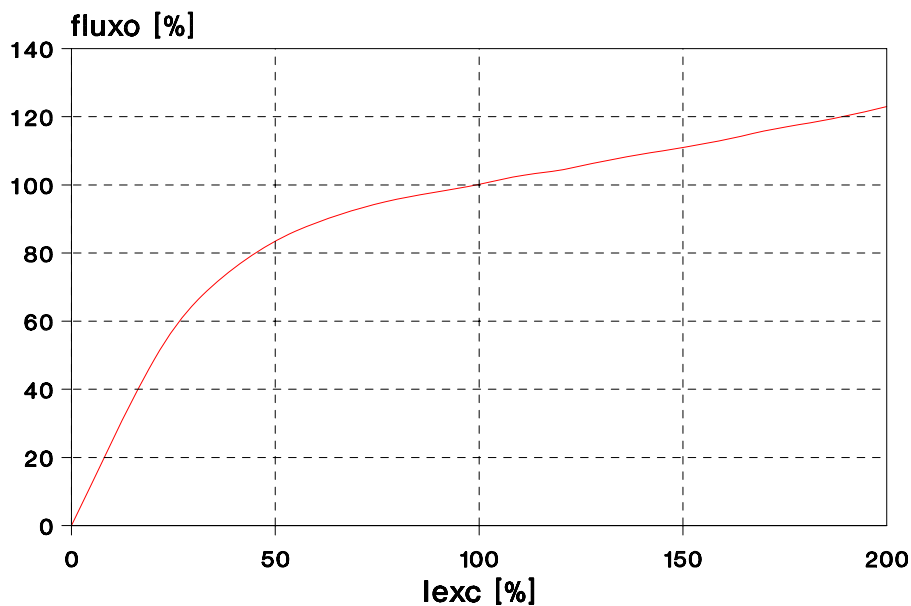
$R_E$  - resistência do circuito de excitação [ohm]

$I_E$  - corrente de excitação [A]

A corrente de excitação  $I_E$  circulando pelas  $N$  espiras do enrolamento de excitação (campo), origina o fluxo magnético  $\Phi$ . A relação entre este fluxo e a corrente de excitação  $I_E$  depende da característica de magnetização do circuito magnético da máquina, conforme mostra a figura 16.



**Figura 15 - Esquema básico do gerador com excitação independente.**



**Figura 16 -Curva característica que relaciona o  $\Phi$  e  $I_E$  .**

Fornecendo-se energia mecânica ao eixo da máquina a armadura vai girar, sendo então induzida a FEM "e", cujo valor médio "E" é definido pela expressão (9), ou seja:

$$E = C_2 \cdot \Phi \cdot n$$

Com fechamento da chave  $K_1$  indicada na figura 15, circulará a corrente de armadura  $I_A$  e nos terminais do gerador resultará a tensão  $U_A$  definida pela equação:

$$U_A = E - R_A I_A \quad (11)$$

onde:

$U_A$  - tensão nos terminais da máquina [V]

$E$  - valor médio da FEM induzida na máquina [V]

$R_A$  - resistência do circuito de armadura [ohm]

$I_A$  - corrente de armadura [A]

A circulação da corrente de armadura provoca o aparecimento de um conjugado eletromagnético que atua contra o sentido de movimento da armadura. Este conjugado é dado por:

$$M = K \cdot \Phi \cdot I_A \quad (12)$$

onde:

$M$  - conjugado [N.m]

$\Phi$  - fluxo [Weber]

$I_A$  - corrente de armadura [A]

$K$  - constante dependente de características da máquina

Observe que a constante  $K$  da equação (12) tem um valor diferente da constante  $C_2$  da equação (9).

## EXEMPLO 2:

Uma máquina de corrente contínua operando com excitação independente, apresenta os seguintes dados nominais:

$$\begin{aligned} U_{AN} &= 240 \text{ [V]} & n_N &= 1000 \text{ [rpm]} \\ I_{AN} &= 300 \text{ [A]} & \eta_N &= 85\% \\ R_A &= 0,035 \text{ [ohm]} & J &= 80 \text{ [kg.m}^2\text{]} \end{aligned}$$

- Estando a máquina operando como gerador, qual a potência mecânica fornecida à armadura nas condições nominais?
- Qual é a FEM desenvolvida na máquina nas condições nominais?
- Qual é o valor da constante  $C_2 \Phi_N$  da máquina em consideração?
- Determine o tempo de frenagem da máquina desde os 1000[rpm] até 800 [rpm] quando ligada a uma resistência de 0,42 [ohm] e desligada da máquina motriz.

## SOLUÇÃO:

a) Como a máquina opera como gerador de corrente contínua, a potência mecânica entregue a seu eixo está vinculada à elétrica pelo rendimento desenvolvido nas condições operacionais. Assim deve-se calcular o valor da potência elétrica que o gerador está fornecendo à carga. Desta forma tem-se:



$$P_{EL} = U_{AN} \cdot I_{AN}$$

$$P_{EL} = 240 \times 300$$

$$P_{EL} = 72 \text{ [kW]}$$

Levando-se em conta o rendimento da máquina obtém-se, então, a potência mecânica fornecida ao eixo da armadura.

$$P_{MEC} = \frac{P_{EL}}{\eta}$$

$$P_{MEC} = \frac{72}{0,85}$$

$$P_{MEC} = 84,71 \text{ [kW]}$$

b) A queda de tensão desenvolvida pela circulação da corrente nominal pela armadura da máquina é dada por:

$$R_A \cdot I_{AN} = 0,035 \cdot 300$$

$$R_A \cdot I_{AN} = 10,5 \text{ [V]}$$

Então, a partir de (11) resulta:

$$E = U_{AN} + R_A I_{AN} = 240 + 10,5$$

$$E = 250,5 \text{ [V]}$$

c) A partir da equação 9, vem:

$$C_2 \cdot \Phi_N = \frac{E_N}{n_N} = \frac{250,5}{1000}$$

$$C_2 \Phi_N = 0,2505 \text{ [V/rpm]}$$

d) Nas condições operacionais propostas pelo exemplo, a corrente de armadura é dada por:

$$I_A = \frac{0,2505 \cdot n}{0,42 + 0,035}$$

$$I_A = 0,551 \cdot n$$

O conjugado desenvolvido pela máquina na frenagem será calculado pela equação 12, ou seja:

$$M = K \cdot \Phi \cdot I_A$$

A constante  $K \Phi_N$  (a frenagem é feita com o fluxo nominal) pode ser determinada a partir das condições nominais:

$$K \cdot \Phi_N = \frac{M_N}{I_{AN}}$$

O conjugado nominal também deve ser obtido das condições nominais. Deste modo:

$$M_N = \frac{60 \cdot P_N}{2\pi \cdot n_N}$$

$$M_N = \frac{60 \cdot 84.715}{2\pi \cdot 1000}$$

$$M_N = 808,9 \text{ [N.m]}$$

Assim:

$$K \cdot \Phi_N = \frac{808,9}{300}$$

$$K \Phi_N = 2,696 \text{ [N.m/A]}$$

Desta forma, conclui-se:

$$M = 2,696 \times 0,551 \cdot n$$

$$M = 1,484 \cdot n$$

Durante o processo de frenagem a máquina motriz é desativada e o conjugado produzido pelo gerador passa a ser o conjugado de frenagem (desprezando-se os esforços de atrito). Desta forma, tem-se:

$$M_{fR} = 1,484 \cdot n$$

Cabe salientar que o conjugado frenante não é independente da velocidade. Desta forma deve-se utilizar a equação (3) da página 5, que está colocada a seguir.

$$M_{fR} = \frac{2\pi}{60} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt}$$

Assim:

$$1,484 \cdot n = \frac{2\pi}{60} \cdot 80 \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$n = 1,411 \cdot \frac{dn}{dt}$$

Desta forma, resulta:

$$t_{fR} = 1,411 \int_{n_{fR}}^n \frac{dn}{n}$$

onde:

$n_{fR}$  - velocidade final da frenagem

$n$  - velocidade inicial da frenagem

Como:

$$\int \frac{dx}{x} = \ln x$$

Obtém-se:

$$t_{fR} = 5,644 [\ln 1000 - \ln 800]$$

$$t_{fR} = 1,26 \text{ [s]}$$