

# ESTUDO PARA PROTEÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO\*

Matheus Oliveira Pereira<sup>1</sup>  
Marcelo de Oliveira Lima<sup>2</sup>  
Túlio Miranda Moreira<sup>3</sup>

## Resumo

Esse artigo tem como objetivo mostrar que proteções destinadas a motores de indução trifásico de rotor bobinado não são efetivas quando se tem determinadas falhas no rotor, e então propor alternativas práticas para uma proteção eficaz. A elaboração consistirá de um estudo com base em normas, livros e práticas recomendadas que descrevem métodos de proteção para motores de indução. Além disso, uma simulação será realizada para comprovar que tais métodos de proteção realmente não conseguem proteger o motor em estudo, bem como ser um adicional ao acervo literário com indicações de métodos para a proteção dos motores de indução de rotor bobinado.

**Palavras-chave:** Proteção; Falhas; Motor de indução de Rotor Bobinado.

## STUDY FOR PROTECTION OF WOUND-ROTOR INDUCTION MOTORS

### Abstract

This article aims to propose to show that protections intended for three-phase wound-rotor induction motors are not effective when there are certain failures in the rotor and then propose technical practices to make effective protection. The elaboration will consist of a study based on standards, books and recommended practices that describe methods of protection for induction motor. In addition, a simulation will be realized to prove that such protection methods really cannot protect the motor in studied, as well as being an additional to the literary collection with indications of methods for the protection of wound-rotor induction motors.

**Keywords:** Protection; Fault; wound-rotor induction motor.

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Elétrica, Estudante, FAESA, Vitória, Espírito Santo, Brasil.  
<sup>2</sup> Engenharia Elétrica, Engenheiro Eletricista, ArcelorMittal, Vitória, Espírito Santo.  
<sup>3</sup> Engenharia Elétrica, Engenheiro Eletricista, Montanha, Espírito Santo, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Motores de indução trifásicos (MIT) são máquinas elétricas que transformam energia elétrica em mecânica, através do princípio do eletromagnetismo. São usualmente utilizadas em indústrias para movimento e transporte de cargas. Os motores de indução são caracterizados como transformadores rotativos, por terem o mesmo princípio de funcionamento através da indução eletromagnética [1]. A aplicação de proteção contra falhas elétricas para os MIT depende do tipo de característica construtiva de cada motor e aplicação, apesar de que a proteção para os motores de indução deve ser bem dimensionada com uma certa cautela devido ao princípio de funcionamento deles.

Segundo Anderson (2012), o problema no qual consiste de uma boa proteção de rotor para máquinas de indução é que pelos métodos tradicionais não é possível medir diretamente as correntes ou temperaturas no próprio rotor. A proteção para motores de rotor bobinado são mais difíceis que motores em gaiola de esquilo, e as proteções comumente praticadas talvez não sejam adequadas a proteção de motores de rotor bobinado.

A literatura presente que descreve a proteção para os MIT é abrangente para as falhas recorrentes da alimentação, estados com base no lado do estator e das condições físicas do motor. Porém, quando se entra numa pesquisa referente à proteção de alguma falha recorrente no rotor do MITRB, não foram encontradas muitas menções nas quais listam ou descrevem as consequências e proteções caso alguma falha venha a acontecer no rotor.

As falhas típicas no rotor do motor de indução de rotor bobinado (MITRB), que serão estudadas nesse artigo, consistem nas falhas elétricas: falta de fase, desbalanço de resistências rotóricas e falta à terra. Para comprovar que através do sensoriamento do estado de operação do motor pode-se captar as grandezas físicas e selecionar uma proteção mais adequada para um MITRB, uma simulação de um modelo de MITRB através de um software de modelagem será desenvolvida. Dentro dessa simulação, as análises comportamentais das falhas no motor serão abordadas no decorrer deste artigo.

O presente estudo tem como objetivo mostrar que o MITRB ao apresentar algumas falhas no seu sistema elétrico do rotor, o comportamento do estator se mantém sem mudanças, isso é, em condições de operação normais. E quando há alguma mudança nesse comportamento, as condições de falhas não são totalmente perceptíveis ao lado do estator. As proteções usuais para o MIT que teriam de enxergar tais falhas não atuam no momento da falha, podendo causar danos ao motor. Deste modo, ao realizar esse estudo, será possível selecionar qual tipo de proteção mais adequado à cada falha.

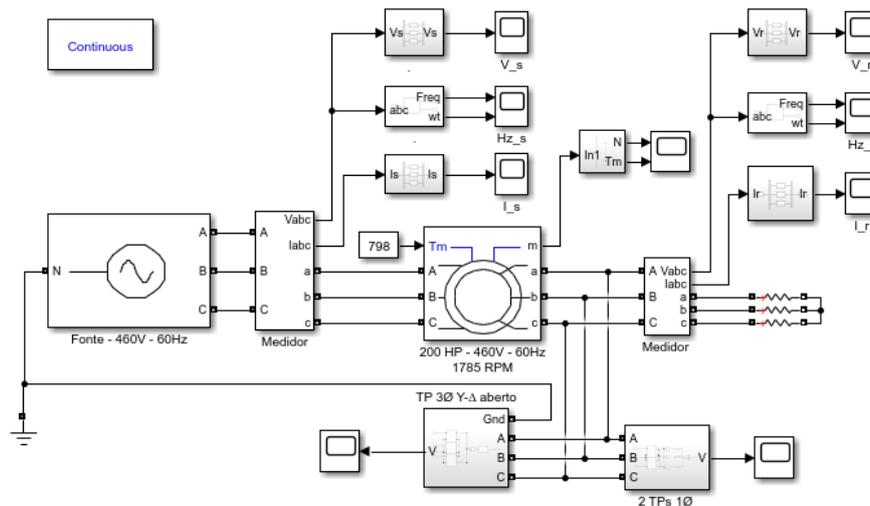
## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1. Construção da Simulação

Nesta seção serão abordados aspectos para modelagem computacional do MITRB, com finalidade de mostrar a simulação em condições normais e nominais de funcionamento, e as falhas empregadas ao rotor do tipo de motor em estudo, que

são: a falta à terra, desbalanço de resistências rotóricas, falta de fase. A reprodução do MITRB consistirá via *software*, através do Simulink, uma extensão do Matlab.

A Figura 1 a seguir mostra modelo de simulação que foi desenvolvido, para permitir monitorar variáveis elétricas e mecânicas do estator e do rotor do MITRB. Foi incluído no modelo um TP trifásico (3Ø) Y-Δ aberto no circuito do rotor visando verificar a eficácia da proteção de fuga à terra citada pelo Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE, 2001). Motivando-se na solução para fuga à terra, foi desenvolvido um novo método de proteção que são os dois TP monofásicos (1Ø) inseridos no rotor com o intuito de investigar a possibilidade de os mesmos serem utilizados para proteção de determinadas falhas.



**Figura 1.** Esquemático simulado de um motor de indução de rotor bobinado, via Simulink.

O modelo da simulação é composto por uma fonte senoidal com o valor nominal de tensão e frequência do motor, um bloco com valor constante simbolizando o torque eletromagnético nominal, blocos medidores, um bloco (*powergui*) especialista para simular sistema elétrico da biblioteca do Simulink, e resistências rotóricas externas adotadas de 0.005775 ohm ( $\Omega$ ). O torque eletromagnético do motor utilizado através de uma constante (798) para expressar o valor nominal. Todas essas grandezas foram mostradas através do bloco escopo.

O Simulink possui um bloco de uma máquina assíncrona que foi configurado como motor de rotor bobinado. O modelo do motor selecionado tem os dados nominais de 200 Horse Power (HP), 460 Volts (V), 60 Hertz (Hz) e 1785 Rotação Por Minuto (RPM). Para a configurações internas do motor, foi inserido os valores de resistência de 0,01818  $\Omega$  e indutância 0,00019 henry (H), para o circuito do rotor referido ao estator resistência de 0,0009956 $\Omega$  e indutância 0,00019 H, e para a indutância mútua de 0,0099414 H.

Em adicional, como o estator e o rotor trabalham com uma determinada frequência, além de verificar a coerência da simulação com que os livros descrevem a respeito do comportamento dos MIT com relação a frequência, foram incluídos blocos de medição de frequência em ambos os lados do motor, de modo a observar também o comportamento dela em situações de falhas.

A biblioteca do Simulink dispõe para criação dos TP um bloco de transformador com dois tipos de seleção: 3Ø e 1Ø. Na execução da simulação foi selecionado o transformador 1Ø para montagem dos dois métodos que envolvem TP. Para a visualização do que está acontecendo com o rotor, será adotado um TP 3Ø com ligação em Y-  $\Delta$  aberto, mostrado na Figura 2 a seguir.

A Figura 3 abaixo mostra como proposta desse artigo, os dois TP 1Ø com as entradas primárias do transformador ligadas em paralelo com as fases A, B e C do rotor e as secundárias ligadas a um medidor de tensão.

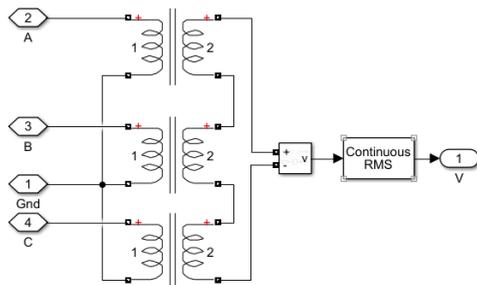


Figura 2. TP 3Ø Y- $\Delta$  com  $\Delta$  aberto.

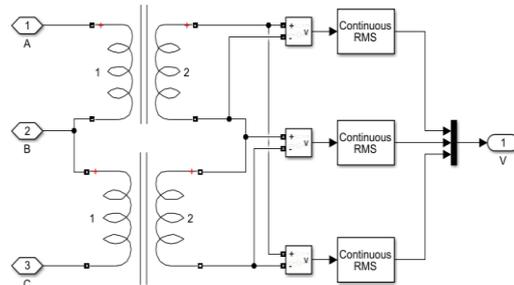


Figura 3. Dois TP 1Ø.

Na situação de falhas, para simular um desbalanço nas resistências rotóricas, variou-se em cinco vezes uma das fases das resistências do rotor, sendo assim as resistências externas das fases A, B e C foram ajustadas para: 0,028875  $\Omega$ , 0,005775  $\Omega$  e 0,005775  $\Omega$ , respectivamente.

Já para simular a falha com uma fase do rotor aberta, foi alterada uma das resistências externas das fases em um número bastante elevado em relação as resistências externas iniciais. Para essa resistência o valor resistivo de 100000  $\Omega$  foi adotado, com intuito de simular uma fase aberta.

A simulação de fuga à terra consiste na implementação de um bloco da biblioteca do Simulink, chamado *ground*, entre o bloco do motor de estudo e as resistências rotóricas externas, aplicado a qualquer uma das fases dentro desse circuito com as resistências sem variação nessa última.

## 2.2. Análise dos Resultados

Esta seção abordará pontos das simulações envolvidas na detecção de falhas. Especificamente no desenvolvimento para a análise das falhas no rotor são referentes ao desbalanço de fase, a falta de fase e falta à terra, descrevendo todos os detalhes relacionadas aos resultados obtidos. Para demonstração de resultados de todos os estados do MITRB citados anteriormente serão utilizadas tabelas.

Como a documentação do bloco Máquina Assíncrona (Asynchronous Machine) utilizado para simulação do MITRB esclarece que as tensões e correntes medidas são referidas ao estator, os valores exibidos na simulação e na análise também terão a mesma característica. No entanto, para um melhor entendimento será tratado para contexto de análise e simulação uma nomenclatura de *rotor'* para quando as grandezas do rotor estiverem referidas ao estator, e apenas rotor quando for referido ao próprio.

**Tabela 01.** Condições nominais e sem falhas em regime

CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO MITRB EM REGIME PERMANENTE				
Grandeza	Fases			Unidade
	A	B	C	
Corrente do estator	216	215,6	215,5	A
Corrente do rotor'	199,5	199	199,4	A
Tensão do estator	460	460	460	V
Tensão do rotor'	1,99	1,98	1,99	V $\emptyset$
Torque	806,9			N*m
Velocidade	1778			RPM
Frequência do estator	60			Hz
Frequência do rotor	0,6527			Hz
TP 3 $\emptyset$ Y- $\Delta$ Aberto	0			V
Dois TP 1 $\emptyset$	1,99	1,98	1,99	V $\emptyset$

A unidade V $\emptyset$  significa volts por fase.

A Tabela 1 consta todas as grandezas de interesse, com a medição dos dados internos do MITRB em regime permanente. Decorrente a tabela acima, a seguinte Tabela 2 estabelece limites para o modelo do MITRB no momento no qual haverá a atuação da proteção do mesmo.

**Tabela 2.** Limites de proteção do estator para o modelo de motor em estudo em situação sem falhas

Função de proteção	Atuar acima de	Grandeza nominal			Média	Desvio da média			Pick up	Atua?	Unidade
		Fase A	Fase B	Fase C		Fase A	Fase B	Fase C			
Sobrecarga (49)	115,00%	216	215,6	215,5	215,7	-	-	-	248,06	NÃO	A
Desbalanço de corrente (46)	15,00%	216	215,6	215,5	215,7	0,3	0,1	0,2	32,36	NÃO	A
Sobretensão (59)	120,00%	460	460	460	460	-	-	-	552,00	NÃO	V $\emptyset$
Desbalanço de tensão (47)	5,00%	460	460	460	460	0,00	0,00	0,00	23,000	NÃO	V $\emptyset$

Segundo o IEEE (2016) e Mardegam (2012), estabelecem que para as proteções de desbalanço de corrente (46) e de tensão (47) atuem caso a diferença entre o desvio da média seja maior de 15% para a função 46, e maior que 5% para a função 47 entre as fases. E para caso onde houver sobretensão (59) a atuação acontecerá em 120% da tensão nominal, quando qualquer uma das fases atingir tal percentual, e sobrecorrente (49) após de 115% da média da corrente nominal.

E como proposta desse estudo, também será colocado as funções de proteções destinadas a leitura do rotor do motor, como mostrado na Tabela 3 a seguir. Visto em conta os resultados na condição sem falha, por razões de motivos óbvios as proteções descritas tanto para as Tabela de 2 e 3, nenhuma função de proteção é sensibilizada para atuação.

**Tabela 3.** Limites de proteção do rotor' para o modelo de motor em estudo em situação sem falhas.

Função de proteção	Atuar acima de	Grandeza medida			Média	Desvio da média			Pick up	Atua?	Unidade
		Fase A	Fase B	Fase C		Fase A	Fase B	Fase C			
Sobrecarga (49)	115,00%	199,5	199	199,4	199,3	-	-	-	229,20	NÃO	A
Desbalanço de corrente (46)	15,00%	199,5	199	199,4	199,3	0,2	0,3	0,1	29,90	NÃO	A
Sobretensão (59)	120,00%	1,99	1,98	1,99	1,99	-	-	-	2,38	NÃO	V $\emptyset$
Desbalanço de tensão (47)	5,00%	1,99	1,98	1,99	1,99	0,00	0,01	0,00	0,099	NÃO	V $\emptyset$

A Tabela 4 a seguir mostra a apresentação dos resultados das simulações com falhas presentes no motor em regime, daqui em diante será abordado primeiramente o caso do desbalanço de resistências rotóricas e do caso de falha da falta de fase. Segundo a IEEE (2008), as falhas o “desbalanço” e a “falta” apresentam

similaridade, e apenas diferenciando-se apenas pelo grau de intensidade. Por isso elas serão apresentadas e discutidas paralelamente, e por fim será a fuga à terra. Em adicional, também serão feitos aspectos comparativos e pequenas análises com base nessa tabela, e ela também será mencionada repetidamente.

**Tabela 4.** Condições de falhas em regime do modelo simulado no Simulink.

CONDIÇÕES DE FALHAS EM REGIME										
Grandeza	Desbalanço de Resistência			Fase Aberta			Fuga à terra			Unidade
	FASE A	FASE B	FASE C	FASE A	FASE B	FASE C	FASE A	FASE B	FASE C	
Corrente do estator	227,6	224,3	223,1	305,8	305,6	305,6	216	215,6	215,5	A
Corrente do rotor'	151	229,3	223,2	0	356,8	356,6	199,5	199	199,4	A
Tensão de linha no estator	460	460	460	460	460	460	460	460	460	V
Tensão de fase no rotor'	2,46	5	4,89	26,24	4,11	26,06	1,99	1,98	1,99	V $\phi$
Torque	762,3~886,4			(-146,9)~1799			807			N*m
Velocidade	1755~1778			884,5~903,6			1778			RPM
Resistência do estator	0,01818			0,01818			0,01818			$\Omega$
Resistência do rotor'	0,009956			0,009956			0,009956			$\Omega$
Resistência rotórica externa	0,028875	0,005775	0,005775	100k~ $\infty$	0,005775	0,005775	0,005775	0,005775	0,005775	$\Omega$
Frequência do estator	60			60			60			Hz
Frequência do rotor	0,509~1,299			0,7848~2,043			0,6527			Hz
Tensão no TP 3 $\phi$ Y- $\Delta$ Aberto	0			0			3,723			V
Tensão nos dois TP 1 $\phi$	2,46	5	4,9	15,22	4,11	14,96	1,99	1,98	1,99	V $\phi$

A diante serão considerados apenas variáveis elétricas como tensão e corrente de ambos os lados, do estator e do rotor' com base na Tabela 4 acima. Como no caso não houve alterações nas tensões do estator, as funções que verificam tensão não veem tais falhas.

### 2.2.1 Correntes do Estator

Observando as correntes que circulam pelo estator no momento que ocorrem as falhas, e comparando com a Tabela 2 com todas as funções que envolvem a proteção do estator com medição de corrente, listadas na Tabela 4, os valores medidos não se aproximam do valor limite estabelecido para atuação da proteção, exceto por uma.

Comparando os valores dessa Tabela 4 com a Tabela 5 a seguir, junto a Tabela 2 para a corrente, somente a função de sobrecorrente (49) das proteções conseguem atuar para proteger o motor. Contudo, deve se precaver dessas proteções, pois como essa função 49 pode apresentar sobrecarga e/ou rotor bloqueado, o que a torna eficaz, mas não eficiente.

**Tabela 5.** Comparação das correntes do estator com as proteções quando há alguma falha.

FALHAS	Função de proteção	Pick up	Fase A	Fase B	Fase C	Média	Desvio da média			Atua?	Unidade
							FASE A	FASE B	FASE C		
Desbalanço de resistência	Sobrecarga (49)	248,4	227,4	224,2	224,2	225,267	-	-	-	NÃO	A
	Desbalanço de corrente (46)	32,4	227,4	224,2	224,2	225,267	2,13	1,07	1,07	NÃO	A
Falta de Fase	Sobrecarga (49)	248,4	308,5	307	306,7	307,4	-	-	-	SIM	A
	Desbalanço de corrente (46)	32,4	308,5	307	306,7	307,4	1,10	0,40	0,70	NÃO	A

Para a falha no desbalanço de resistências a função 49 devido ao valor médio e na função 46 devido ao desvio da média terem pouca variação, ambas não visualizam, não ultrapassando o valor de *pick up*. Na falta de fase, a função 46 não atua e para a sobrecarga (49), há uma ultrapassagem de 59 A do valor médio perante ao de *pick up*.

### 2.2.2 Correntes do Rotor'

A Tabela 4 anteriormente mostra que o rotor em estado de falhas expõe uma particularidade de efeitos nas grandezas elétricas que são diferentes do estator. Essas falhas no ponto de vista do rotor' expressam um distúrbio no funcionamento do mesmo. Também expõe as amplitudes da corrente do rotor' quando há um desbalanço de resistências rotóricas, que no aumento da resistência desenvolve um desequilíbrio nas correntes do rotor'. Devido ao desbalanço, se uma proteção destinada a verificação dessa grandeza, ela consegue atuar protegendo o motor. Para ambas as falhas no rotor' as funções de proteção: 46 e 49 conseguem visualizar tal falha, como visto na Tabela 6 a seguir.

**Tabela 6.** Comparação das correntes do rotor' com as proteções quando há alguma falha.

FALHAS	Função de proteção	Pick up	Fase A	Fase B	Fase C	Média	Desvio da média			Atua?	Unidade
							FASE A	FASE B	FASE C		
Desbalanço de resistência	Sobrecarga (49)	229,2	158,2	232	227,7	205,967	-	-	-	NÃO	A
	Desbalanço de corrente (46)	29,9	158,2	232	227,7	205,967	47,77	26,03	21,73	SIM	A
Falta de Fase	Sobrecarga (49)	229,2	0	358,9	358,9	239,267	-	-	-	SIM	A
	Desbalanço de corrente (46)	29,9	0	358,9	359,9	239,6	239,60	119,30	120,30	SIM	A

A Tabela 6 mostra que a função 49 não consegue captar a falha no desbalanço de resistências devido ao valor médio não superar o de *pick up*, contudo a variação da média vista na função 46 conseguem visualizar devido a diferença de 47,77 na fase A. Pode-se dizer então, que para a variação até 5 vezes de uma das resistências, a função 49 não conseguirá atuar, dependendo apenas da intensidade do desbalanço das resistências. Ambas as proteções para falta de fase, 46 e 49 conseguem captar essa falha devido a ambas superarem o valor de *pick up*.

### 2.2.3 Tensões no Rotor'

O Tabela 4 anteriormente mostra a tensão do método dos dois TP monofásicos, ela apresenta uma variação de tensão entre fases no rotor' no estado de desbalanço. A tendência com o aumento das resistências até o circuito aberto é aumentar a diferença entre as tensões de fase do sistema. A tensão para ambas as falhas, tanto de desbalanço de resistência quanto a falta de fase têm o mesmo comportamento nas três amplitudes de fases, diferenciando apenas no grau de desbalanço.

As funções de proteção: 47 e 59, caso sejam implementadas no circuito do rotor' conseguem ver tal variação de amplitude e desbalanço entre fases, assim bem como indicada na Tabela 7 a seguir.

**Tabela 7.** Comparação das tensões do rotor' com as proteções quando há alguma falha.

FALHAS	Função de proteção	Pick up	Fase AB	Fase BC	Fase CA	Média	Desvio da média			Atua?	Unidade
							FASE AB	FASE BC	FASE CA		
Desbalanço de resistência	Sobretensão (59)	2,38	5,21	2,49	5,13	4,28	-	-	-	SIM	V
	Desbalanço de tensão (47)	0,099	5,21	2,49	5,13	4,28	0,93	1,79	0,85	SIM	V
Falta de Fase	Sobretensão (59)	2,38	17,70	4,14	17,69	13,18	-	-	-	SIM	V
	Desbalanço de tensão (47)	0,099	17,70	4,14	17,69	13,18	4,53	9,04	4,52	SIM	V

Na situação das duas falhas, as duas funções 47 e 59 conseguiram visualizar todas as duas falhas. A função 59 pela amplitude de uma das fases medidas superarem o valor de *pick up* configurado. E do mesmo jeito para o desbalanço de tensão (47) atua com a ultrapassagem dos valores de desvio da média serem mais altos que o

*pick up*. Mesmo com valores baixos de tensão é possível visualizar tais falhas recorrentes do lado do rotor.

Essa variação de resistências, através das duas falhas de desbalanço de resistência rotóricas e falta de fase, não representam um grau de interferência significativa ao circuito do estator. De modo com que as proteções 46, 47 e 59 destinadas a elas consigam captar, isso é, para proteções que trabalham com variações de grandezas elétricas não as veem, exceto a proteção 49 para falta de fase que também pode ser interpretada como uma sobrecarga do motor ou rotor bloqueado.

A fuga à terra traz para essas simulações uma análise peculiar. Ela apresenta os mesmos resultados de condições de operação sem falhas, tornando imperceptíveis qualquer alteração de tensão no estator, correntes e frequências, torque ou velocidade. A visualização dessa falha, como citada por Mello (1979) e descrita pela IEEE (2012), é possível detectar através de um TP 3Ø Y- $\Delta$  com o  $\Delta$  aberto.

A falha à terra mostra como no resultado das simulações que o método para proteção Y-  $\Delta$  aberto consegue medir a tensão. A função 59 consegue detectar a variação da tensão de 3,552 V gerada pela fuga à terra. Isso pode ser aplicado uma função de proteção de modo a detectar tal falha. Contudo, essa falha não existe efetivamente no rotor, como análise a tal afirmativa pode ser explicada através do estudo de sequência positiva, negativa e zero. Segundo Kinderman (1997), o MIT não possui sequência zero, ou seja, seu circuito elétrico é aberto para faltas à terra

Em adicional ao Kinderman, os motores são usualmente construídos com ligações  $\Delta$ -Y ou Y-Y, o seu lado primário ( $\Delta$  ou Y não aterrado) é definido como o estator, e o secundário (Y não aterrado) o rotor. Quando a fuga terra é perceptível, não faz sentido ao tipo de ligação presente no rotor, a circulação de corrente à terra em Y não há como ser fisicamente possível devido ao fato de não haver conexão com a própria. O que leva à questão explicada por IEEE (2001), que quando detectadas correspondem a um início de dano aos enrolamentos do rotor.

Na próxima etapa desse artigo veremos uma análise comparativa dos resultados das simulações obtidas com os tipos de proteções adequadas.

### **2.3 Métodos de Proteção Propostos**

A seção anterior apresentou a análise das proteções que visualizam as falhas no rotor, e como visto as proteções para o MITRB não são visualizadas por nenhuma das funções propostas para o estator, exceto para a função de sobrecarga (49), que consegue visualizar, mas não consegue identificar está acontecendo efetivamente com o motor, em específico no rotor.

A Tabela 9 a seguir mostra resumidamente proteções as quais o MITRB podem ser protegidos. Visto em conta os resultados mostrados no tópico anterior, algumas das falhas não são perceptíveis as proteções típicas nas quais são submetidas. Pois, como simulado elas não expressaram nenhuma variação significativa ao lado referido que essas proteções atuam, no caso o estator. Exceto pela falha de fase aberta que aumenta a corrente no estator, promovendo a atuação do dispositivo de proteção o através da função 49.

**Tabela 9.** Tipos de métodos de proteção para o rotor versus as falhas que ocorrem no mesmo.

Tipos de proteção	Falhas		
	Falta de Fase (A)	Desbalanço de Resistências (B)	Fuga à terra (C)
2 TP 1Ø - Função: 47 e 59	X	X	
3 TC 1Ø - Função: 46 e 49	X	X*	
TP 3Ø Y-Δ aberto - Função: 59			X

\*A função de sobrecarga (49) até 5 vezes uma das resistências, não pega o desbalanço de resistências rotóricas.

Apesar das simulações mostrarem a eficácia das soluções apresentadas na Tabela 9, existe dificuldades de implementações práticas dos métodos protetivos nas falhas com os TP e os TC, devido as baixas frequências do rotor. Conclui-se que devido as essas deficiências nos TP e TC, a melhor solução recomendada, que é a principal contribuição para as falhas estudadas, para as falhas “A” e “B” na Tabela 9, seria o uso de sensores de corrente: Bobina de Rogowsky e/ou o sensor de Efeito Hall.

No presente estudo, não se identificou uma alternativa para proteção “C”, na tabela 9, em substituição ao TP 3Ø Y-Δ aberto. Apesar de possuir referências bibliográficas, os autores desconhecem a eficácia desta solução tendo em vista que o TP 3Ø Y-Δ aberto teoricamente também possui restrições práticas para o uso em baixas frequências.

O método proposto do TP 3Ø Y-Δ aberto e antemão ao método proposto de inovação de medição através dos dois TP monofásicos desenvolvido nesse artigo, mostraram eficiência e eficácia dos métodos. Mostraram que conseguem visualizar as falhas de ocorrência no rotor do MITRB, para que dispositivos com funções de proteções consigam atuar. As funções 47 e 59 se mostraram uma ótima forma de verificar a variação das tensões no rotor, devido a verem todas as falhas, contudo não foi encontrado um TP que melhor se adeque a medição dessas tensões de forma mais eficiente.

Em contrapartida, os TP por mais que sejam considerados métodos de proteção a falhas, para a proteção do rotor do motor de rotor bobinado, eles ainda apresentam uma deficiência em seu sistema em respostas a frequências baixas. Isso talvez possa a vir ser uma restrição para seu uso nos rotores, visto que as frequências são baixíssimas como mostrados na seção anterior.

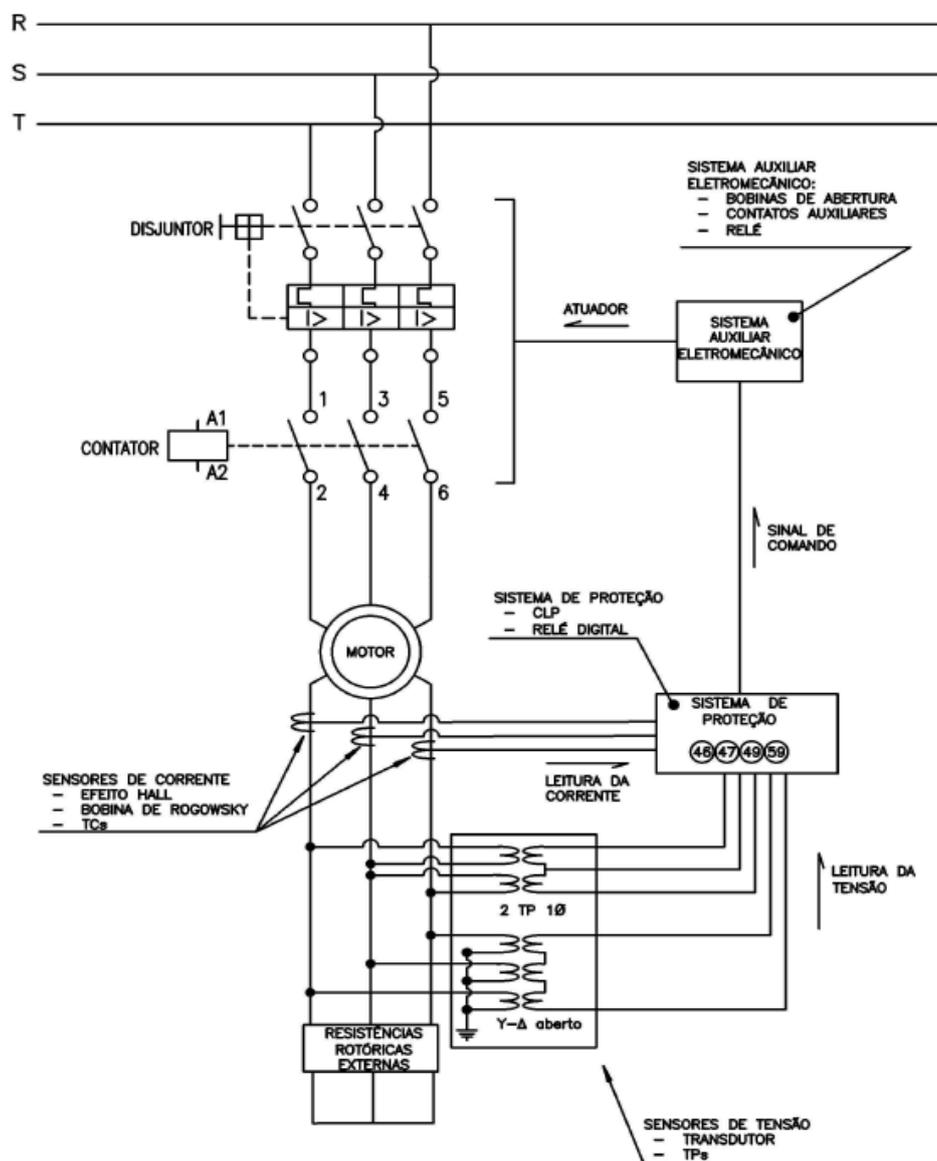
Em concordância aos resultados e segundo Coutinho (2010), os transformadores em regiões de baixas frequências de operação compreendem em defeitos de origem indutiva. Em adicional com os estudos de Bacil (2014) esses defeitos podem apresentar variação determinada principalmente pelas indutâncias de magnetização do núcleo e capacitâncias para a massa, além da magnetização residual do núcleo, visto que seus elementos parasitas alteram sua dinâmica.

A leitura das correntes também pode ser feita a partir de TC, contudo os TC, assim como no caso dos TP, possuem problemas de saturação com relação a frequência baixa. Segundo Khan (2017), com a redução da frequência, a tensão através do ramo de magnetização do TC diminui para manter a densidade de fluxo. Assim, a característica de excitação dele é reduzida. Consequentemente essa variação pode afetar o sistema de medição com a saturação do TC. A operação do motor a baixa

frequência, mesmo em correntes de baixo nível a operação do motor em baixa frequência nominal não apenas desclassifica a característica de excitação do TC, mas também resulta num erro de medição fasorial.

Em comparação com as aplicações de proteção do MITRB envolvendo sensoriamento de corrente, também como no caso do dois TP 1Ø, os sensores indicados abaixo são também um novo método inovador de sensoriamento de corrente que conseguem trabalhar na leitura da corrente no rotor. O TC devido a sua saturação em baixas frequências não é a melhor aplicação, mas não deixa de ser uma proteção. Como a Bobina de Rogowsky e o Sensor de Efeito Hall conseguem trabalhar nas frequências baixas do rotor, que através de uma margem de segurança de sensoriamento, conseguem sinalizar para os atuadores caso haja uma diferença significativa de parâmetros normais do rotor.

Foi elaborado um esquemático que ilustra as ligações dos dispositivos citados nesse artigo com o circuito do MITRB. Esse esquemático está representado pela Figura 4.



**Figura 4.** Esquemático de ligação das proteções do motor de rotor bobinado.

O sistema de proteção do rotor bobinado deve conter também controladores e atuadores. As soluções apresentadas acima são somente os sensores, os dispositivos que visualizaram o problema. Os leitores das respostas desses sensores, os sistemas de proteção, assim como: o CLP e relés digitais, esses devem estar padronizados com os dados de estado de operação do motor. Como ressalva ao CLP, ele foi considerado devido a não possuir nenhum curto referente nas falhas, e com isso o tempo de resposta do CLP para atuação nas falhas não é um problema. E os atuadores eletromecânicos, que com as respostas dos controladores atuarão sobre o dispositivo de alimentação.

Com base nos sinais gerados pelos sensores e o sistema de proteção fora das condições normais de operação, os atuadores eletromecânicos, como: disjuntores, contatores, contatos auxiliares e bobinas de abertura, serão responsáveis em abrir o sistema, interrompendo o funcionamento. Os contatores do mesmo modo ao CLP, deve ser considerado como ressalva visto em conta as falhas apresentadas não possuírem grandes magnitudes de corrente no estator, esse contator podia ser utilizado para o seccionamento no caso de o sistema de proteção detectar alguma das falhas estudadas nesse artigo.

### 3 CONCLUSÃO

O desenvolver desse artigo mostrou que quando ocorrem as falhas de desbalanço de resistências rotóricas externas, falta de fase e fuga à terra no rotor do MITRB, o sistema de proteção destinado a proteger o motor, através de práticas recomendadas para motores de indução não são totalmente vistas pela proteção. Em específico o motor de rotor bobinado não tem proteções destinadas ao mesmo visto em conta o grau de dificuldade que envolve a proteção dele. A partir dos resultados apresentados na simulação, foi possível observar que mesmo com as proteções destinadas para alguns tipos de falhas em específicas, que são geralmente voltadas ao estator, não percebem falhas do rotor. Isso leva à prática de outras medidas de detecção das falhas.

O estudo mostrou que para as falhas de fuga à terra, como citado nas seções 3 e 6, o TP  $Y-\Delta$  aberto conseguem detectar a falha com a variação de sua tensão nos terminais do delta, o que implica que um dispositivo implementado com a função 59 consiga perceber e com isso sinalizar aos dispositivos de proteção uma atuação dentro dos limites projetados e de operações do MITRB, tendo em vista que esse método tem como finalidade de percepção de uma falha no isolamento dos enrolamentos do rotor.

A proposta desenvolvida nesse estudo, os dois TP monofásicos, também apresentaram uma nova forma de avaliação da tensão do rotor como instrumento de proteção. Com ele, foi possível avaliar o comportamento das tensões do rotor, em situações onde há as falhas de: desbalanço de resistência e na falta de fase, podendo ser vistas por esse método, cujo avalia os tipos de desbalanços que podem ocorrer no sistema do MITRB. Esse método tem como ressalvas as frequências baixas, como dito no capítulo anterior. Abrindo possibilidades a equipamentos voltados a proteção através de transdutores de tensão de leitura de grandezas, frequência e tensão, de valores baixos.

Outra possibilidade de visualização das mesmas falhas que são vistas pelo método desenvolvido nesse artigo, os dois TP monofásicos, consiste na proteção através de TC, que como visto, também anteriormente, não apresenta melhores funcionalidades de proteção devido a saturação de seu núcleo magnético em frequências baixas. Abrindo a possibilidade de visualização da falha através das Bobinas de Rogowsky e do Sensor de Efeito Hall. Além dos sensores, também deve ser incluso um controlador e um atuador para proteção do MITRB.

Além desses tipos de sensoriamento, o de tensão e corrente, também foi mostrado que necessita de dispositivos com funções 46, 47, 49 e 59 de proteção voltadas ao lado do rotor, juntamente com dispositivos que façam a leitura de parâmetros e atuação.

## REFERÊNCIAS

- 1 Chapman SJ Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- 2 Anderson PM. Power system protection. Indian: Wiley, 2012. XXIV.
- 3 Institute of Electrical and Electronics Engineers. Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems. IEEE, 2001, 739 p.
- 4 Institute of Electrical and Electronics Engineers. Recommended practice for motor protection in industrial and commercial power systems. IEEE, 2016.
- 5 Mardegan C. Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais. São Paulo: Atitude, 2012.
- 6 Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations. IEEE, 2008.
- 7 Mello FP. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Santa Maria, 1979.
- 8 Institute of Electrical and Electronics Engineers. Guide for AC Motor Protection. IEEE, 2012.
- 9 Kinderman G. Curto Circuito. 2. Ed. São Paulo: Sagra Luzzatto, 1997, 228p.
- 10 Coutinho LMA. Modelagem de transformadores de potência utilizando técnicas no domínio da frequência. Dissertação [Mestrado em Engenharia Elétrica] – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- 11 Bacil V. Metodologia para medição de resposta em frequência em transformador energizado. Dissertação [Mestrado em Engenharia Elétrica] – Universidade Federal do Paraná, 2014.
- 12 Khan U, Voloh I, Robinson P. Considerations for Dependability of the Motor Protection on Corrent Tranformers Performance in VFD Aplications. IEEE, 2017.