

Study to implement energy efficiency improvements and energy generation supplements for an animal feed factory on a rural property off the grid.

B. C. Kermessi, *discente, UFGD.*, E. Biasotto, *docente, UFGD.*, G. B. Gibelli, *docente, UFGD.*, O. M. Junior, *docente, UFGD.*

Abstract-- This paper presents the dimensioning of two alternatives for improving energy efficiency, the retrofit and power factor correction of a feed mill on a rural property with a micro-hydro generation system isolated from the grid and also two alternatives to complement the current insufficient energy generation: generation with a diesel motor generator set and photovoltaic generation without the use of batteries.

The steps needed to ensure compatibility between both systems in the retrofit are shown, as well as the calculation flow needed to correctly dimension the power factor correction for electric motors and transformers and, based on the characteristics of the corrected system, the dimensioning needed to choose a motor-generator set and a photovoltaic system without batteries.

Index Terms— Energy efficiency, Microgrids, Microhydro power, Power control, Solar energy.

I. INTRODUÇÃO

SABE-SE que a disponibilização e, portanto, o fornecimento de energia elétrica a áreas e centros urbanos podem ser vistas como menos custosas em relação a propriedades rurais principalmente por conta da distância entre as unidades consumidoras em relação as linhas de distribuição.

As propriedades rurais que não se encontram próximas as subestações ou de linhas de alta-tensão podem ser consideradas como excluídas do fornecimento de energia principalmente devido aos altos custos relacionados aos serviços de extensão e conexão da rede de distribuição com as propriedades rurais, o alto custo que somado ao perfil econômico geralmente de baixa renda dos proletariados rurais torna o acesso à energia elétrica ainda mais difícil [1].

Este problema enfrentado pelos proprietários rurais de baixa e média renda em relação ao acesso de energia elétrica já era conhecido pelo governo federal e esteve presente nas ações e programas de diversos governos. Em 1948 com o objetivo de promover o acesso à energia elétrica em propriedades rurais e incentivar a criação de sociedades organizadas sem fins lucrativos e contratos com cooperativas rurais criou-se a lei nº

8/1948 que instituiu o Serviço de Fomento à Eletrificação Rural [2].

Em seguida no ano de 1957 foi implementada a lei nº41.019 que passou a responsabilizar as concessionárias de energia em relação ao fornecimento de energia elétrica regional [3]. Mas, que apesar dos objetivos de acordo com [4],

“*não houve qualquer resultado concreto a partir da aprovação dessa lei*”.

Portanto, diversos produtores rurais buscaram métodos de geração própria de energia, empregando outras fontes potencialmente naturais, que poderiam fornecer energia para a realização de um trabalho, na época as mais comuns eram a energia eólica e a geração de energia elétrica a partir de máquinas hidráulicas [5].

Devido à necessidade de irrigação, é comum que os proprietários possuam acesso a rios em suas propriedades, e caso estes possuam fluxo suficiente pode-se, com auxílio de turbinas hidráulicas compatíveis com a potência disponível no local, converter essa energia mecânica-hidráulica em energia mecânica-motriz, que será entregue a um gerador para ser aproveitada.

Em sistemas de microgeração hidrelétrica, a capacidade de geração de energia é definida pelo potencial hidráulico local, um recurso finito. Diante dessa restrição, torna-se crucial projetar sistemas elétricos com alta eficiência energética para otimizar o uso da energia disponível.

Implementar medidas de eficiência energética, como correção do fator de potência, escolha de equipamentos eficientes e adoção de hábitos de consumo consciente, permitem reduzir o consumo de energia e garantir que o sistema opere dentro dos limites da geração local. Isso contribui para a viabilidade de quaisquer circuitos e cargas que sejam posteriormente instaladas.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram levantadas as cargas de motores elétricos de uma

B. C. Kermessi é acadêmico no curso de Engenharia de Energia pela FAEN na UFGD Dourados, Dourados-MS, CEP 79804970, Brasil (e-mail:bkermessiac@hotmail.com).

E. Biasotto é professor no curso de Engenharia de Energia pela FAEN na UFGD, Dourados-MS, CEP 79804970, Brasil (e-mail:etiennebiasotto@ufgd.edu.br).

G. B. Gibelli é professor no curso de Engenharia de Energia pela FAEN na UFGD, Dourados-MS, CEP 79804970, Brasil (e-mail: gersongibelli@ufgd.edu.br).

O. M. Junior é professor no curso de Engenharia de Energia pela FAEN na UFGD, Dourados-MS, CEP 79804970, Brasil (e-mail: orlandojunior@ufgd.edu.br).

fábrica de ração animal, transformadores e gerador que atualmente compõem o sistema de uma propriedade rural localizada no município de Campo grande – MS que conta com uma micro geração hídrica insuficiente para a fábrica, dessa forma, a metodologia consiste no propósito de dimensionar e comparar dois métodos de melhoria de eficiência energética: *retrofit* e correção de fator de potência com capacitores e a partir das características corrigidas das cargas dimensionar dois métodos de geração de energia complementar: geração com grupo motor gerador a diesel e fotovoltaica sem armazenamento de energia.

A. Componentes do Sistema e Levantamento de Cargas

Os principais locais analisados no trabalho como a sala onde está localizado o conjunto gerador turbina hidráulica da Fig. 2, os transformadores, a fábrica de rações e a linha de distribuição em amarelo podem ser visualizados pela Fig. 1, gerada por meio de [6].



Fig. 1. Pontos de interesse da propriedade vistas por uma visão de satélite.

A geração de energia é realizada por um gerador trifásico de potência instalada de 52 kVA acoplado por correias a uma turbina hidráulica, o arranjo pode ser visualizado na Fig. 2.



Fig. 2. Arranjo do gerador acoplado por correias ao eixo da turbina hidráulica.

A geração é realizada em 380 V, elevada a 13800 V até a fábrica de ração e então rebaixada novamente para 380 V com

uma relação de transformação de aproximadamente 36,3.

São utilizados dois transformadores aéreos trifásicos resfriados a óleo da fabricante WEG, o primeiro de 112,5 kVA e o segundo de 75 kVA utilizados como rebaixador e elevador de tensão respectivamente, visíveis na Fig. 1.

A fábrica de ração visível na Fig. 3, possui 13 motores elétricos, 10 motores de 3 cv, 2 motores de 15 cv e um motor de 25 cv todos eles partindo em estrela triângulo.



Fig. 3. Visão dos equipamentos e quadro de automação dos motores elétricos da fábrica de ração animal.

Por conta de todos os motores atuais de 3 cv terem sido fabricados no ano de 1995 e as fabricantes serem obrigadas a fornecer os dados por somente 10 anos a WEG não possuía mais as folhas de dados desses motores e devido as placas de identificação apresentarem somente as características de funcionamento do motor para 100% de carga de trabalho eles foram substituídos inicialmente por motores de 10 cv equivalentes com mesma velocidade síncrona e que possuísse a mesma corrente nominal para os cálculos.

Os dados dos motores estão expostos na Tabela I, adaptada das folhas de dados dos motores pela fabricante [7].

TABELA I
 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES ELÉTRICOS.

		Potência (cv)	25	15	10
		Modelo carcaça	160M	132M	132M
		Corr nom. (A)	13,1	21,2	14,9
380V	% de carga	Fator de Rendime nto	100%	91,5	90,5
			75%	91,5	90,5
			50%	91	89,6
	Fator de potência		100%	0,87	0,88
			75%	0,83	0,84
			50%	0,74	0,75

Conhecidas as características dos motores foi necessário determinar as potências dos mesmos para posteriormente realizar o retrofit e a correção do fator de potência por meio do uso de capacitores.

As potências elétricas P_{ele} , aparentes P_{ap} e reativas indutivas P_{ri} foram calculadas por meio de (1), (2) e (3) respectivamente.

$$P_{ele} = \frac{cv * 0,735499}{\frac{Rend}{100}} \tag{1}$$

Onde cv é a potência mecânica do motor e $Rend$ é o rendimento do motor.

$$P_{ap} = \frac{P_{ele}}{F_p} \tag{2}$$

Onde P_{ele} é a potência elétrica do motor e F_p é o fator de potência do motor.

$$P_{ri} = \sqrt{P_{ap}^2 - P_{ele}^2} \quad (3)$$

Onde P_{ap} é a potência aparente do motor e P_{ele} é a potência elétrica do motor.

A partir dos dados da Tabela I foram somadas as potências elétricas e reativas e calculadas as potências aparentes, os valores obtidos estão na Tabela II

TABELA II
POTÊNCIAS FINAIS DOS MOTORES POR PORCENTAGEM DE CARGA.

		resultados	
Pot. Ele. (kW)	% de carga	100%	68,72
		75%	68,78
		50%	69,35
Pot. R. (kVAR)	% de carga	100%	119,04
		75%	130,22
		50%	161,45
Pot. Ap. (kVA)	% de carga	100%	137,45
		75%	147,27
		50%	175,72

Constatou-se que os fatores de potência das cargas dos motores foram de 0.39, 0.47 e 0.50 para as porcentagens de 50%, 75% e 100% de carga respectivamente.

B. Implementação do Retrofit

Buscando a melhoria do fator de potência, por meio do retrofit, foi considerado a substituição de todos os motores atuais por motores mais eficientes que atendem os novos requisitos de rendimentos nominais mínimos exigidos por [8], especificamente pelos motores da linha super premium W22 da WEG que estão em conformidade com os novos critérios de eficiência energética.

Para garantir a compatibilidade mecânica entre os novos motores e as máquinas atuais, os novos motores possuem a mesma velocidade síncrona, número de polos e modelo de carcaça que os atuais.

Os motores de 25 cv, 15 cv e 3 cv escolhidos foram os de código 15199057, 15249394 e 15208400 respectivamente, que possuem as seguintes características expostas na Tabela III.

TABELA III
CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE ALTA EFICIÊNCIA.

Potência (cv)		25	15	3			
Modelo carcaça		160M	132M	132M			
380V	Corr nom. (A)		34,9	22,4	4,87		
		% de carga	Rendim ento	100%	92,8	92	90,3
				75%	92,8	91	88,7
	50%			92	88,6	87	
	Fator de potência	100%	0,87	0,81	0,76		
		75%	0,83	0,79	0,69		
		50%	0,74	0,68	0,55		

Novamente foram somadas as potências elétricas e reativas e calculadas as potências aparentes para os novos motores expostos na Tabela IV.

TABELA IV
POTÊNCIAS FINAIS DOS MOTORES DE ALTA EFICIÊNCIA POR PORCENTAGEM DE CARGA.

Potência (cv)		25	15	3	
Modelo carcaça		160M	132M	132M	
Pot. Ele. (kW)	% de carga	100	19,81	23,98	24,44
		75	19,81	24,25	24,88
		50	19,99	24,90	25,36
Pot. R. (kVAR)	% de carga	100	13,28	19,82	24,45
		75	15,09	21,40	28,56
		50	19,68	29,28	40,53
Pot. Ap. (kVA)	% de carga	100	22,77	29,61	32,15
		75	23,87	30,69	36,05
		50	27,01	36,62	46,11

Os valores finais foram calculados resultando na Tabela V.

TABELA V
POTÊNCIAS FINAIS DOS MOTORES DE ALTA EFICIÊNCIA POR PORCENTAGEM DE CARGA.

		resultado	
Pot. Ele. (kW)	% de carga	100	68,23
		75	68,94
		50	70,25
Pot. R. (kVAR)	% de carga	100	56,55
		75	65,05
		50	89,48
Pot. Ap. (kVA)	% de carga	100	88,62
		75	94,78
		50	113,77

Constatou-se que os fatores de potência das cargas dos motores de alta eficiência foram de 0.62, 0.73 e 0.77 para as porcentagens de 50%, 75% e 100% de carga respectivamente.

C. Correção de Fator de Potência com Capacitores

De acordo com [9], são considerados 5 tipos de correção: correção na entrada da energia de alta tensão, correção na entrada de energia de baixa tensão, correção por grupo de cargas, correção localizada e a correção mista.

As correções na entrada de energia de alta e baixa tensão são consideradas somente nos casos onde o consumidor é conectado à rede e quer deixar de pagar multas para a concessionária. Eles foram desconsiderados pois buscou-se melhorar as características do sistema a fim de se exigir a menor potência possível da geração atual.

Foi então decidido dimensionar e comparar as performances das correções por grupo de cargas, correção localizada e a correção mista que contempla as duas primeiras.

A potência reativa capacitiva P_{rc} necessária para elevar o fator de potência de um motor elétrico para um valor desejado pôde ser calculada por (4).

$$P_{rc} = P_{ri} - \sqrt{\left(\frac{P_{ele}}{F_{pd}}\right)^2 - (P_{ele})^2} \quad (4)$$

Onde P_{ri} é a potência reativa indutiva do motor, P_{ele} é a potência elétrica do motor, F_{pd} é o fator de potência desejado.

E a potência reativa capacitiva necessária para elevar o fator de potência de um transformador funcionando a vazio Q_o para o recomendado pela WEG de 0,9 pôde ser obtida por (5).

$$Q_o = \sqrt{\left(\frac{\left(\frac{I_o}{I_{ns}} * 100\right)^2}{100}\right) - P_o^2} * 0,9 \quad (5)$$

Onde I_o é a corrente em vazio do transformador, I_{ns} é a corrente nominal no secundário do transformador e P_o é a potência de perda a vazio.

Para os transformadores de 112,5 e 75 kVA, os dados foram retirados da folha de dados do fabricante, pelo uso de (5) foi obtido que eles precisam de 2,5186 kVAR e 1,8117 kVAR capacitivo respectivamente, no primeiro pode-se instalar um capacitor de 2,5 kVAR e no segundo o maior valor que não ultrapassa o dimensionado foi de 1,5 kVAR, que eleva seu fator de potência para 0,74.

Para os 3 métodos distintos de correção da WEG a serem seguidos que foram dimensionados os fatores de potência alvo escolhidos foram 0,92, 0,95 e 0,98. A escolha desses valores baseou-se nos seguintes critérios técnicos e regulatórios: 0,92, valor mínimo exigido pela ANEEL, autarquia responsável pela regulação do setor elétrico brasileiro; 0,98, valor próximo de 1, considerado o ideal para a eficiência energética, mas ainda abaixo do limite máximo para facilitar a manutenção do caráter indutivo das cargas após as correções e 0,95, valor intermediário entre os dois anteriores, selecionado de forma arbitrária para fins de comparação e análise.

Na Tabela VI estão expostas as potências reativas capacitivas calculadas por (4), necessárias para elevar o fator de potência de um motor de acordo com seu tipo, exemplificado para 0,98.

TABELA VI
 POTÊNCIA REATIVA CAPACITIVA NECESSÁRIA PARA ELEVAR O FATOR DE POTÊNCIA DE UM MOTOR PARA 0,98.

	FATOR DE POTÊNCIA DESEJADO		
	0,98		
MOTOR	50%	75%	100%
25CV	14,2628	9,4237	7,3081
15CV	8,3588	5,3989	4,1044
3CV	11,6392	9,6031	8,9564

O mesmo foi realizado para 0,92 e 0,95. Os valores foram somados entre todos os motores e expostos na Tabela VII que informa a potência reativa capacitiva total necessária.

TABELA VII
 POTÊNCIA REATIVA CAPACITIVA NECESSÁRIA PARA ELEVAR O FATOR DE POTÊNCIA DE TODOS OS MOTORES PARA O FP DESEJADO.

FP desejado	% de carga dos motores		
	50%	75%	100%
0,92	131,9115	100,9196	89,7595
0,95	138,6601	107,6126	96,4473
0,98	147,3721	116,2528	105,0808

Os valores da Tabela VI foram arredondados para potências maiores, menores e mais próximas das potências de capacitores disponíveis comercialmente para a seleção dos capacitores da correção localizada, originando então a Tabela VIII.

TABELA VIII
 CAPACITORES APROXIMADOS AOS DISPONÍVEIS COMERCIALMENTE DOS VALORES DE POTÊNCIA DA TABELA VI.

		FATOR DE POTÊNCIA DESEJADO		
		0,98		
		50%	75%	100%
25 CV	MAIOR	15	10	7,5
	MENOR	12,5	7,5	5
	MAIS PRÓXIMO	15	10	7,5
15 CV	MAIOR	10	7,5	5
	MENOR	7,5	5	3
	MAIS PRÓXIMO	7,5	5	5
3 CV	MAIOR	12,5	10	10
	MENOR	10	7,5	7,5
	MAIS PRÓXIMO	12,5	10	10

Devido ao arredondamento, foi calculado qual será o fator de potência final obtido caso um dos capacitores acima seja instalado em um motor. Uma nova equação para calcular o fator de potência foi necessária pois (2) depende da potência aparente que por si só depende de um fator de potência pré-estabelecido que após a instalação do capacitor ainda não é conhecido.

A Equação (6) permite que por trigonometria o fator de potência final com capacitor FP_{fc} seja calculado baseado na potência elétrica do motor que é fixa e na potência reativa resultante que é conhecida.

$$FP_{fc} = \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{P_{ri} - P_{rc}}{\sqrt{P_{ele}^2 + (P_{ri} - P_{rc})^2}}\right)\right) \quad (6)$$

Onde P_{ri} é a potência reativa indutiva do motor, P_{rc} é a potência reativa capacitiva do capacitor e P_{ele} é a potência elétrica do motor.

Por meio dela foi criada a Tabela IX, que expõe os fatores de potência que serão alcançados para os motores caso os capacitores da Tabela VIII sejam instalados para a correção localizada.

TABELA IX
 FATOR DE POTÊNCIA QUE SERÁ OBTIDO PELO MOTOR COM A INSTALAÇÃO DO CAPACITOR APROXIMADO DA TABELA VIII.

		Fator de potência desejado		
		0,98		
		50%	75%	100%
25 cv	maiores	0,9864	0,9851	0,9618
	menores	0,9604	0,9581	0,9530
	mais próximo	0,9864	0,9851	0,9818
15 cv	maiores	0,9976	0,9995	0,9917
	menores	0,9647	0,9733	0,9595
	mais próximo	0,9647	0,9733	0,9917
3 cv	maiores	0,9892	0,9992	0,9751
	menores	0,7538	0,6833	0,7795
	mais próximo	0,9892	0,9992	0,9751

As células evidenciadas sublinhadas em negrito foram os casos onde a potência reativa capacitiva do capacitor ultrapassou a potência reativa indutiva do motor o tornando uma carga capacitiva, estes capacitores serão evitados.

Além disso foi realizada a escolha de capacitores para montar dois bancos automáticos de capacitores de 12 estágios, um para todas as cargas de motores na correção de grupo e outro para somente o grupo de motores de 3cv na correção mista.

Por meio da Tabela VII para o fator de potência desejado de 0,98 o pior caso ocorre com todas as cargas em 50% onde é necessário 147,3721 kVAR. Esse valor máximo foi utilizado

para montar uma combinação de 12 capacitores que somados chegassem o mais próximo dele.

Pela mesma lógica utilizada para criar as Tabelas VI e VIII, foi obtido que o menor capacitor necessário para elevar o fator de potência dos motores para o mínimo escolhido de 0,92 foram de 2,5, 1 e 7.5 kVAr para os motores de potência de 25, 15 e 3 cv respectivamente. Eles serão utilizados nos bancos automáticos como ajuste fino caso poucos motores sejam ligados ao mesmo tempo.

Foi criada então a Tabela X que evidencia as potências dos capacitores que irão compor o primeiro banco da correção de grupo.

TABELA X
 POTÊNCIA DOS CAPACITORES QUE IRÃO COMPOR O BANCO AUTOMÁTICO PARA TODOS OS MOTORES.

Nº capacitor	Potência capacitor (kVAr)
1	17,5
2	17,5
3	17,5
4	15
5	15
6	15
7	15
8	15
9	7,5
10	7,5
11	2,5
12	1
Soma	146

Para o grupo de motores de 3cv obter o fator de potência desejado de 0,98 o pior caso ocorre quando as cargas estão em 50% e é necessário 116,3917 kVAr capacitivo, que foi considerado como o valor máximo do banco.

TABELA XII
 POTÊNCIAS FINAIS E FATORES DE POTÊNCIA ALCANÇADO ENTRE OS MÉTODOS DE MELHORIA EMPREGADOS.

Nº	Descrição	P. Ap. total (kVA)			P. R. total (kVAr)			P. Ele. total (kW)			FP final		
		50%	75%	100%	50%	75%	100%	50%	75%	100%	50%	75%	100%
1	Retrofit	113,77	94,78	88,62	89,48	65,05	56,55	70,25	68,94	68,23	0,6175	0,7273	0,7700
a	" e capacitores para todos os transformadores	110,24	91,73	85,80	84,95	60,52	52,01	70,25	68,94	68,23	0,6373	0,7515	0,7953
2	Correção localizada	82,10	69,94	68,74	43,95	12,72	1,54	69,35	68,78	68,72	0,8446	0,9833	0,9998
a	" e capacitor para o transformador da fábrica de ração animal	80,78	69,53	68,73	41,44	10,20	-0,98	69,35	68,78	68,72	0,8584	0,9892	0,9999
3	Correção mista	70,95	68,91	68,72	14,98	4,28	0,11	69,35	68,78	68,72	0,9775	0,9981	1,0000
a	" e capacitor para o transformador da geração	70,55	68,81	68,75	12,96	2,27	-1,90	69,35	68,78	68,72	0,9830	0,9995	0,9996
4	Correção de grupo	71,05	70,23	70,14	15,45	14,22	14,04	69,35	68,78	68,72	0,9761	0,9793	0,9798
a	" e capacitor para todos os transformadores	70,20	69,46	69,38	10,92	9,69	9,50	69,35	68,78	68,72	0,9878	0,9902	0,9906

D. Dimensionamento de Geração a Diesel

Considerando que a propriedade conta com um gerador de 52 kVA, foi exposto na Tabela XIII a porcentagem de potência que o gerador atual consegue fornecer e a potência que falta ser gerada para as configurações da Tabela XII. A potência faltante foi utilizada para dimensionar os grupos motores geradores a diesel posteriormente.

Foi obtido então a Tabela XI que evidencia as potências dos capacitores que irão compor o segundo banco automático, que é o da correção mista.

TABELA XI
 POTÊNCIA DOS CAPACITORES QUE IRÃO COMPOR O BANCO AUTOMÁTICO PARA O GRUPO DE MOTORES DE 3CV.

Nº capacitor	Potência capacitor (kVAr)
1	17,5
2	15
3	15
4	15
5	12,5
6	12,5
7	7,5
8	7,5
9	7,5
10	3
11	2,5
12	1
Soma	116,5

Finalizados os cálculos anteriores de retrofit e dimensionamentos de capacitores foi criada a Tabela XII que evidencia 4 correções e uma variação de cada solução de melhoria da eficiência energética entre si: Retrofit sem e com capacitores para os transformadores, correção localizada sem e com capacitor para o transformador da fábrica, correção mista que se dá pelo uso de capacitores fixos nos motores com cv>10 e banco automático para os motores de 3cv sem e com capacitor para o transformador da geração e correção de grupo que se dá pelo uso de um único banco automático para todos os motores sem e com capacitor para todos os transformadores

TABELA XIII
 POTÊNCIA FALTANTE PARA AS CONFIGURAÇÕES

Nº	potência entregue (%)	Potência faltante (kVA)
1	45,71	61,77
a	47,17	58,24
2	63,33	30,10
a	64,37	28,78
3	73,29	18,95
a	73,71	18,55
4	73,19	19,05
a	74,07	18,20

O gerador foi dimensionado para o regime de funcionamento de “Energia Prime” com tempo ilimitado de funcionamento pois devido à natureza dos motores elétricos haverá instantes de sobrecarga intrínsecos a este tipo aplicação.

Nas aplicações de energia prime a carga não deve exceder 70% da capacidade do gerador e devido o perfil de funcionamento que exige que todos os motores estejam trabalhando ao mesmo tempo, o fator de carga (que é razão da demanda média pela demanda máxima) é 1. Portanto, a potência faltante da Tabela XIII deverá ser no máximo 70% da potência dos geradores selecionados.

Os geradores selecionados estão presentes na Tabela XIV.

TABELA XIV
POTÊNCIAS REQUERIDAS PARA REGIME PRIME E GERADORES SELECIONADOS.

Nº	Pot. prime (kVA)	Gerador	Pot. Max gerador (kVA)
1	88,24	DE110E2	100
a	83,20		
2	43,01	DE50E0	45
a	41,12		
3	27,07	DE33E0	30
a	26,50		
4	27,21		
a	26,01		

E foram eles os grupos motores geradores diesel da Caterpillar 100 kVA DE110E2, 45 kVA DE50E0 e 30 kVA DE33E0 visíveis na Fig. 4.



Fig. 4. Grupos motores geradores trifásicos a diesel da marca Caterpillar selecionados.

E. Dimensionamento do Sistema de Geração de Energia Elétrica Fotovoltaica

Para o dimensionamento do sistema de geração fotovoltaica primeiro foi feito o levantamento adequado do recurso solar disponível no local da aplicação.

Para tal utilizou-se de [10] que se destina ao cálculo da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional a partir da inserção das coordenadas geográficas da propriedade rural. O mesmo forneceu dados disponíveis de três estações meteorológicas mais próximas. Uma do município de Campo grande- MS e duas do município de Nova alvorada do sul- MS, localizadas à 1,6, 9 e 10,5 km de distância da coordenada.

Os dados da estação mais próxima, do município de Campo grande- MS selecionada, estão presentes na Tabela XV.

TABELA XV
DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA MÉDIA MENSAL PARA AS COORDENADAS DA PROPRIEDADE RURAL PELA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE CAMPO GRANDE- MS.

Inclinação	mês				
	0° N	22° N	19° N	32° N	
Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]	Jan.	5,73	5,18	5,28	4,78
	Fev.	5,77	5,49	5,57	5,19
	Mar.	5,33	5,47	5,48	5,33
	Abr.	4,67	5,26	5,21	5,33
	Mai.	3,87	4,71	4,63	4,92
	Jun.	<u>3,52</u>	<u>4,49</u>	<u>4,38</u>	<u>4,76</u>
	Jul.	3,66	4,57	4,47	4,81
	Ago.	4,59	5,37	5,3	5,53
	Set.	4,81	5,09	5,09	5,04
	Out.	5,44	5,29	5,35	5,05
	Nov.	5,89	5,38	5,48	4,99
	Dez.	6,24	5,54	5,66	5,06
	Média	4,96	5,15	5,16	5,07
	Delta	2,71	1,05	1,28	0,77

Os números sublinhados e em negrito indicam o menor e o maior valor para a radiação solar diária média mensal de acordo com o plano de inclinação.

Contando que o sistema é isolado e é preciso garantir seu funcionamento ao longo de todo o ano foi selecionada a inclinação de 32°N pois possui a menor variação anual e o mês de junho que possui o menor valor médio. Foi utilizado o método do mês crítico proposto por [11], que consiste na realização do dimensionamento do SFI (Sistema Fotovoltaico Isolado) com um balanço de energia durante o período do ano no qual ocorrem as condições médias mais desfavoráveis para o sistema onde supõe-se que se o sistema funcionar adequadamente nesse mês, isso ocorrerá também nos demais meses do ano.

Como o sistema será do tipo diurno, ou seja, sem componentes de armazenamento de energia, é necessária a potência instantânea máxima P_{mp} gerada por cada módulo de hora em hora, utilizou-se o modelo proposto por [12], por meio de (7).

$$P_{mp} = P^0_{FV} \left(\frac{H_{t,b}}{H_{ref}} \right) [1 + \gamma_{mp}(T_c - T_{c,ref})] 0,9 \quad (7)$$

Onde P^0_{FV} é Potência nominal do módulo, $H_{t,b}$ é a irradiância incidente no plano da superfície coletora, H_{ref} é a irradiância da condição padrão de testes incidente no plano da superfície coletora, γ_{mp} é o coeficiente de variação de potência em relação a temperatura, T_c é a temperatura de operação das células e $T_{c,ref}$ é a temperatura referência de operação das células.

A temperatura de operação das células T_c foi obtida por meio de (8) proposta por [13].

$$T_c = T_a + H_{t,b} \left(\frac{T_{NOC} - 20}{800} \right) \quad (8)$$

Onde T_a é a temperatura ambiente, $H_{t,b}$ é a irradiância incidente no plano da superfície coletora e T_{NOC} a Temperatura nominal de operação das células.

Os valores históricos médios de irradiação incidente horária para o plano inclinado $H_{t,b}$ do mês de junho foram obtidos por

meio de [14], onde foi selecionado todo o período histórico disponível de 2001 a 2023.

Os valores históricos de temperatura máxima ambiente T_a foram obtidos da estação meteorológica automática mais próxima, de código S712 em [5]. do município de Nova alvorada do sul – MS.

Os valores de potência nominal do módulo P^0_{FV} , irradiância da condição padrão de testes incidente no plano da superfície coletora H_{ref} , coeficiente de variação de potência em relação a temperatura γ_{mp} , temperatura de referência de operação das células $T_{C,ref}$ e temperatura nominal de operação das células T_{NOC} foram obtidos da folha de dados [16].

A partir destes dados foi criado o gráfico da Fig. 5, onde estão visíveis os dados médios, mínimos e máximos de irradiação incidente horária para dia de céu claro do mês de junho no plano inclinado e as potências instantâneas P_{mp} médias, mínimas e máximas do módulo por hora do dia.

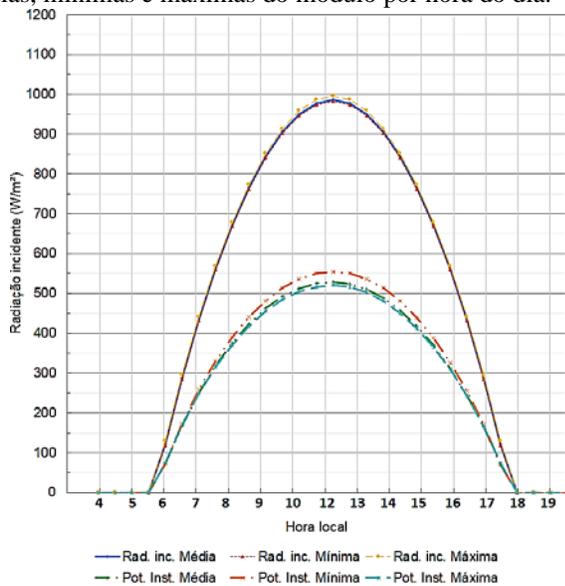


Fig. 5. Radiação incidente e potência instantânea máxima gerado por módulo para dias de céu claro em junho no plano inclinado de 32°.

Foram então selecionados inversores solares de [17] que possuíssem uma potência máxima de saída igual ou maior que os valores de potência faltante para as configurações da Tabela XIV.

Os inversores, seus números máximos de módulos permitidos calculados para as temperaturas máximas históricas de junho e potência máxima de saída estão expostos na Tabela XVI.

TABELA XVI
 VALORES MÁXIMOS DE MÓDULOS SUPOSTADOS E POTÊNCIA DE SAÍDA DOS INVERSORES SELECIONADOS.

Modelo inversor	nº máx. de módulos	Potência máxima de saída (kW)
S5-GR3P20K	50	22
S5-GR3P25K	64	27,5
S5-GC30K	76	33
S5-GC33K	84	36,3
S5-GC36K	92	39,6
S5-GC40K	102	44
S5-GC50K	130	55
S5-GC60K	152	66
Solis-75K-5G	214	75
Solis-80K-5G	214	88

Foi criado então o gráfico da Fig. 6, que ilustra a potência instantânea fornecida de hora em hora pelos conjuntos de módulos solares operando em temperatura máxima limitados pelos valores de potência máxima de saída de seus respectivos inversores e a potência faltante necessária por correção da Tabela XIV.

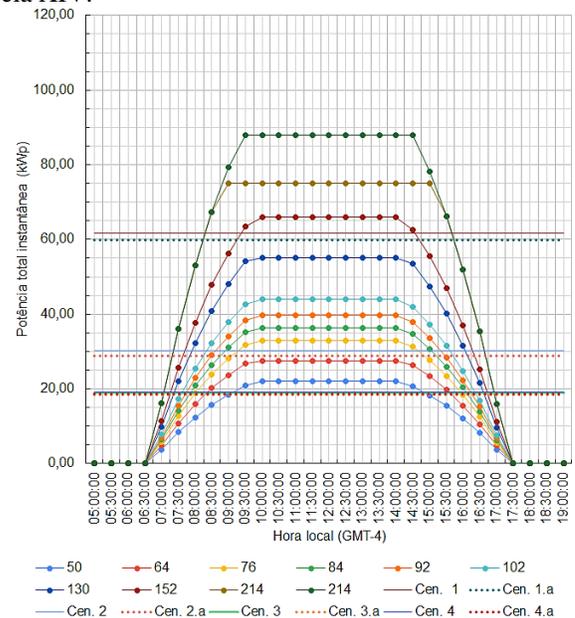


Fig. 6. Potência instantânea horária limitada pela potência máxima de saída dos inversores e potências faltantes pelos métodos de correção.

A potência instantânea máxima de cada inversor foi comparada à potência faltante de cada correção da Tabela XIV. Somou-se o número de horas em que a potência do inversor superava a demanda, originando a Tabela XVII.

Considerando que o proprietário da fábrica de ração animal exigiu que a fábrica operasse em uma jornada de no mínimo 8 horas diárias, os valores na Tabela XVII foram destacados de acordo com os seguintes critérios: **negrito**, indica as horas em que a potência fornecida pelo inversor excede a demanda para cada correção por pelo menos 8 horas; sublinhado, indica as horas em que a potência fornecida pelo inversor não atingiu a demanda por 8 horas.

TABELA XVII
 HORAS DE FORNECIMENTO DE ENERGIA POR CONJUNTO DE INVERSOR E SEUS
 RESPECTIVOS CONJUNTOS DE MÓDULOS SOLARES.

Nº	Modelo do inversor									
	S5-GR3P20K	S5-GR3P25K	S5-GC30K	S5-GC33K	S5-GC36K	S5-GC40K	S5-GC50K	S5-GC60K	Solis-75K-5G	Solis-80K-5G
1	0	0	0	0	0	0	0	5,5	8	8
a	0	0	0	0	0	0	0	5,5	8	8
2	0	0	5,5	6,5	6,5	7,5	8,5	8,5	9,5	9,5
a	0	0	5,5	6,5	7	8	8,5	8,5	9,5	9,5
3	6	7,5	8	8,5	8,5	8,5	9,5	9,5	9,5	9,5
a	6	7,5	8,5	8,5	8,5	8,5	9,5	9,5	9,5	9,5
4	6	7,5	8,5	8,5	8,5	8,5	9,5	9,5	9,5	9,5
a	6,5	7,5	8,5	8,5	8,5	8,5	9,5	9,5	9,5	9,5

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Seleção da Melhoria de Eficiência

Realizados os dimensionamentos necessários, todas as configurações de implementações de eficiência energética propostas pela Tabela XII são melhorias quando comparadas com os dados de potência da Tabela II e os respectivos fatores de potência para diferentes porcentagens de carga.

Para o retrofit (correção 1 e 1a) expostos na Tabela XII, o aumento do rendimento dos motores e aumento do fator de potência principalmente se deu por conta da substituição do grupo de motores de 3cv que representam 70,46% de toda a potência aparente das cargas atuais. Visto isso o fator de potência mínimo foi elevado de 0,39 para 0,64.

Para esta solução, entretanto, é necessário adotar também a instalação de capacitores para os transformadores onde apesar da potência aparente total ser reduzida de 175,72 kVA para 113,77 kVA este valor ainda está acima do limite de potência do transformador da fábrica que é de 112,5 kVA, exigindo que o mesmo seja substituído caso ela seja implementada.

O novo fator de potência mínimo de 0,64 alcançado ainda está abaixo do mínimo exigido de 0,8 para o complemento de energia com um grupo motor gerador e além disso essa opção ainda exige a maior potência de complemento de geração de energia quando comparado as configurações de correção de fator de potência por capacitores.

Entre as configurações 2, 2a, 3, 3a, 4 e 4a. Todas apresentam melhorias mais significativas que as do retrofit onde a correção 2a, reduziu a potência aparente total de 175,72 kVA para 80,78 kVA e elevou o fator de potência mínimo de 0,39 para 0,8584, tanto nesta correção quanto em todas as outras, praticamente toda a potência reativa indutiva para a porcentagem de carga de 100% foi reduzida onde a correção 4 apresentou o pior desempenho com 0,9798.

Apesar disso é perceptível que a instalação de um capacitor fixo por motor possui resultados inferiores em comparação as configurações onde é feito a utilização do banco automático, isso se dá, pela diferença dos incrementos de potência reativa capacitiva dos capacitores comercialmente disponíveis em relação ao necessário para correção do motor onde ao se utilizar um banco automático essa lacuna é preenchida por meio dos capacitores de ajuste fino de menor potência.

Para o conjunto de motores presentes a melhor solução foi a da correção 3a que apresentou a maior média de fator de potência em todas as porcentagens de carga em 0,994016.

B. Seleção do Complemento de Geração de Energia

Para a correção 3a a potência máxima dimensionada que será exigida do gerador será de 18,55 kVA, portanto o gerador selecionado DE33E0 possui a potência máxima de 30 kVA e trabalhará no pior caso com um fator de utilização de 61,83% de sua capacidade máxima cumprindo o requisito de operar abaixo dos 70% para o regime prime, além disso conta com o motor C3.3 mais potente que seu antecessor C2.2 que entrega uma potência mínima após perdas de transmissão de 42,14 CV, que é 5,05 vezes maior que a potência de partida exigida para o maior motor de 25CV partindo em estrela-triângulo cumprindo o requisito mínimo de 3 para garantir um tempo de recuperação de tensão curto após a conexão de uma carga.

Ele deverá também contar com todos os recursos de segurança e sistema automático de transferência de carga pois é considerado que caso seja implementado o mesmo será operado por funcionários leigos. O local de instalação dita diversos outros parâmetros mais complexos como fundação e montagem, sistemas de escape, ventilação, redução de ruídos, proteção contra incêndios, sistema de suprimento de combustível e projeto de recinto do equipamento que não serão discutidos neste trabalho.

Em alternativa a geração a diesel, a seleção do sistema de geração fotovoltaico considerando como um sistema diurno também não pode ser selecionado apenas em quesito da potência máxima entregue pelo inversor e seu respectivo conjunto de módulos.

Além dela também é necessário atender ao requisito de 8 horas de fornecimento de energia propostos na Tabela XVII, portanto para a correção 3a o inversor S5-GC30K com 76 módulos solares DHN-72X16/FS satisfaz os parâmetros requeridos.

C. Análise de Custo

Para a proposta de melhoria de eficiência 3a que consiste na correção mista com o capacitor fixo para a correção a vazio do transformador rebaixador de tensão da fábrica de ração animal, a Tabela XVIII expõe os principais componentes, quantidades e seus respectivos valores assim como o preço total.

TABELA XVIII
 PREÇO FINAL DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DA MELHORIA DE EFICIÊNCIA
 3A.

item	Qtd	Tot. (R\$)
Capacitor WEG trifásico UCVWT1	1	104,67
Capacitor WEG trifásico UCVWT2	1	139,09
Capacitor WEG trifásico UCVWT2,5	1	141,91
Capacitor WEG trifásico UCVWT3	1	193,00
Capacitor WEG trifásico UCVWT7,5	5	561,00
Capacitor WEG trifásico UCVWT10	1	307,00
Capacitor WEG trifásico UCVWT12,5	2	698,92
Capacitor WEG trifásico UCVWT15	3	1.278,69
Capacitor WEG trifásico UCVWT17,5	1	603,56
Controlador Automático do FP PFW01 (12 estágios)	1	4.854,51
Contator 18A para Capacitores10KVAR Trif 220 S-12	3	365,88
Contator 25A para Capacitores15KVAR Trif 220 S-12	4	553,56
Transformador de Corrente 1000/5 Tipo Janela 50	1	109,53
Transformador de Corrente 150/5 Tipo Janela 25	1	55,81
Preço total final (R\$)		9.967,13

Para o complemento de geração de energia a diesel, foi selecionado gerador DE33E0 exposto na Fig. 4.

O custo de um grupo motor gerador (GMG) oscila entre 350,00 a 500,00 US\$/kVA, dentro deste valor está incluso os gastos com equipamentos de comando, como disjuntores, quadros, chaves de transferência automática, contadores etc. Foi adotado o valor de 425,00 US\$/kVA (2262,7 R\$/kVA) para a cotação de câmbio de moeda de fechamento do dólar comercial de [18] de 5,324 R\$/US\$ do dia 09/06/2024.) A partir deste valor foi obtido que o custo de instalação na presente correção é de aproximadamente US\$12.750,00 ou R\$67.881,00.

Para o complemento de geração fotovoltaica, o inversor selecionado foi o inversor S5-GC30K com 76 módulos solares DHN-72X16/FS, o custo unitário do inversor encontrado foi de R\$ 16.842,11 e o custo unitário por módulo foi de R\$ 643,49. Resultando no valor final de R\$65.747,35.

Finalmente, a solução que emprega o uso de energia fotovoltaica possui o custo estimado de R\$75.714,48 e a solução que emprega o uso do grupo motor gerador possui o custo estimado de R\$77.848,13.

O mesmo foi realizado para satisfazer todas as outras condições de configurações da Tabela XII, os valores podem ser comparados na Tabela XIX.

TABELA XIX
 COMPARATIVO DE CUSTOS DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS.

Nº	CUSTOS (R\$)					
	CUSTO MOTORES	CORREÇÃO DE FP COM CAPACITORES	GRUPO MOTOR GERADOR	INVERSOR E MÓDULOS	CUSTO SOLUÇÃO SOLAR	CUSTO SOLUÇÃO DIESEL
1	46.868,89	0,00	226.270,00	177.498,88	224.367,77	273.138,89
A	46.868,89	281,00	226.270,00	177.498,88	224.648,77	273.419,89
2	0,00	5.107,56	101.821,50	106.811,59	111.919,15	106.929,06
A	0,00	5.249,47	101.821,50	86.688,61	91.938,08	107.070,97
3	0,00	9.772,23	67.881,00	65.747,35	75.519,58	77.653,23
A	0,00	9.967,13	67.881,00	65.747,35	75.714,48	77.848,13
4	0,00	10.483,97	67.881,00	65.747,35	76.231,32	78.364,97
A	0,00	10.820,78	67.881,00	65.747,35	76.568,14	78.701,78

Além dos valores propostos na Tabela XIX é valido ressaltar que existem diversos outros custos como, por exemplo, frete, cabos, terminais, componentes dos quadros de comando do banco automático de capacitores, projeto elétrico, disjuntores, mão de obra, construção de um recinto adequado para o gerador que não foram incluídos nesta análise de custos.

IV. CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou que somente o complemento de energia, frequentemente sugerido como solução inicial para sobrecargas, não é a alternativa mais viável na maioria dos casos. Antes de considerar essa opção, é crucial realizar uma análise aprofundada para identificar oportunidades de melhoria na eficiência energética. Caso fosse realizado somente os dimensionamentos para a geração de energia é evidente que os custos dos equipamentos seriam ainda maiores visto que o custo de sistemas de geração de energia, sejam eles um GMG ou sistema fotovoltaico possuem seu preço diretamente atrelado a sua potência nominal, além disso seria necessário substituir o transformador da fábrica de ração animal elevando ainda mais o custo do projeto.

Dentre os métodos de melhoria de eficiência energética analisados, as soluções que empregam as correções de capacitores sejam eles junto a bancos automáticos ou não foram superiores quando comparadas ao retrofit, que mesmo assim não elevou o fator de potência ao mínimo exigido pelas concessionárias de 0,92, o fator de potência mínimo atingido pelo uso de capacitores foi consideravelmente superior com o menor valor sendo de 0,84.

A metodologia de correção de fator de potência mista foi considerada como excelente pois pôde-se alcançar um fator de potência médio de 0,994016 com a correção 3a investindo 4,7 vezes menos capital quando comparado ao retrofit.

As soluções de complemento de geração de energia foram dimensionadas para satisfazerem as necessidades energéticas propostas, e podem ser implementadas separadamente, entretanto caso primeiro seja realizado a implementação da geração solar, entende-se que o mesmo estará susceptível as condições climáticas que são imprevisíveis, apesar disso, caso ela fosse selecionada o proprietário continuaria não pagando nada pela energia gerada assim como é atualmente. Caso queira posteriormente implementar a geração com grupo motor gerador para aumentar a confiabilidade do sistema em dias nublados ou chuvosos os valores já estão dimensionados.

Para trabalhos futuros seria interessante a análise do aumento de geração solar por meio do uso de seguidores solares para a redução do número de módulos necessários a utilização de inversores com potências máximas de saídas maiores para melhor aproveitamento do potencial solar.

V. REFERÊNCIAS

- [1] A. C. J. Jeronymo e S. M.-G. Guerra, “Caracterizando a evolução da eletrificação rural brasileira”, *Redes*, vol. 23, nº 1, p. 133-156, jan. 2018.
- [2] BRASIL. Lei federal nº 8. Cria o Serviço de Fomento de eletrificação rural e dá outras providências. Diário Oficial da União [República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 04. fev.1948.
- [3] BRASIL. Decreto Federal nº 41.019. Obrigatoriedade das concessionárias fornecerem energia elétrica regional. Diário Oficial da União [República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 12. mar. 1957.
- [4] L. C. Oliveira., Perspectivas para eletrificação rural no novo cenário econômico institucional do setor elétrico. Mestrado em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- [5] G. A. Simone., Centrais e aproveitamentos hidrelétricos: uma introdução ao estudo. São Paulo: Érica, 2010.
- [6] GOOGLE. Google Earth. 2024.
- [7] WEG. Seleção de motores elétricos (W22 IR2 Descontinuado). 2024.
- [8] BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Portaria Interministerial nº1, de 29 de junho de 2017. Aprova o Programa de Metas para Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo. Diário Oficial da União [República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 29. jun. 2017.
- [9] WEG. Manual de correção de fator de potência. 2022
- [10] CRESESB. Potencial Solar - SunData v 3.0, 2018.
- [11] J. T. Pinho., M. A. Galdino., MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. Rio de Janeiro: p. 530, mar. 2014.
- [12] O. Gergaud., B. Multon., H. B. Ahmed., Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models. *ELECTRIMACS*, Aug 2002, MONTREAL, Canada. 6p.
- [13] R. Zilles., W. N. Macêdo., M. A. B. Galhardo., S. H. Ferreira de oliveira., Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. In: ZILLES, Roberto *et al.*. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. Santa Maria: Editora Oficina de Textos, 2012. p. 10-53. (ISBN 978-85-7975-235-3).
- [14] PVsyst. PVsyst 7.4. PVsyst SA. Funções. Route de la Maison-Carrée 30 - 1242 Satigny – Switzerland. 2024.
- [15] INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Mapa de estações. 2024.
- [16] DAHSOLAR. Folha de dados: Módulo DAH DHN-72X16/FS-585. 2024.
- [17] SOLIS. Catálogo folha de dados inversores. 2022.
- [18] BRASIL, Banco central do Brasil. Fechamento diário do dólar. 2024.

VI. BIOGRAFIAS



Bernardo de Campos Kermessi nasceu em Dourados, Mato Grosso do Sul, em 17 de setembro de 1999. Atualmente é acadêmico do curso de Engenharia de Energia na Universidade Federal da Grande Dourados (FAEN/UFGD). Suas áreas de interesse são produção de combustíveis a partir de recursos renováveis, ciências térmicas, eficiência energética e instrumentação digital e analógica.



Etienne Biasotto nasceu em Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil, em 23 de janeiro de 1980. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (UNIARA), obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP) em 2009 e 2012, respectivamente. Obteve o título de Especialista em Gestão de Hospitais Universitários pelo Instituto Sírio Libanês de Ensino e Pesquisa (IEP) em 2014. Foi chefe da divisão de logística e infraestrutura do HU/UFGD - EBSEH, diretor da Faculdade de Engenharia e Pró-Reitor de Avaliação Institucional e Planejamento. Atualmente é professor associado e Pró-Reitor de Ensino de Graduação da UFGD. Dentre as áreas de interesse destacam-se a proteção de sistemas elétricos de potência, qualidade da energia elétrica, técnicas de inteligência artificial e planejamento estratégico situacional.



Gerson Bessa Gibelli nasceu na cidade de São Paulo, no Estado de São Paulo, Brasil, em 25 de novembro de 1970. Possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade São Judas Tadeu (2002), Mestrado (2009) e doutorado (2016) em Engenharia Elétrica (Escola de Engenharia de São Carlos) pela Universidade de São Paulo. Foi Diretor da Faculdade de Engenharia no período de 2019-2023 e atualmente é Professor Adjunto na Universidade Federal da Grande Dourados. Suas principais áreas de pesquisa incluem softwares de simulação analítica e numérica, projetos de motores elétricos, proteção de sistemas elétricos de potência, qualidade da energia elétrica, eficiência energética, energias renováveis e técnicas de inteligência artificial.



Orlando Moreira Junior é pós doutor em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional em 2018, Doutor em 2009 pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Campus de Botucatu-SP, no departamento de Engenharia Rural na área de Energia na Agricultura, mestrado pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) pelo departamento de Engenharia Aeronáutica na área de Aerodinâmica, Propulsão e Energia em 1996 e graduação em Física pela Universidade Estadual de Londrina (UEL) em 1993. Atualmente é professor da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) na Faculdade de Engenharia (FAEN) atuando no curso de Engenharia de Energia.