

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA EM SISTEMAS ISOLADOS (TE SISOL)

Estudos de Estabilidade Elétrica e Desempenho –
Produto 10

Como empresa federal de utilidade pública, a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH apoia o Governo Federal da Alemanha em seus objetivos na área de cooperação internacional.

Publicado por: Projeto Sistemas de Energia do Futuro

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH Sede social Bonn e Eschborn, Alemanha SCN Quadra 1 Bloco C Sala 1501, 15 andar, Ed. Brasília Trade Center. CEP 70711-902, Brasília-DF, Brasil Telefone: (61) 2101-2170 www.giz.de/brasil	Ministério de Minas e Energia (MME) Esplanada dos Ministérios, Bloco U Brasília/DF CEP: 70065-900 Telefone: (61) 2032-5555 www.gov.br/mme
--	--

Coordenação

Roberto Castro (GIZ)

Leticia Maciel (GIZ)

Gustavo Pires da Ponte (EPE)

Autores

Álvaro Ramos – Andesa

Daniel Odílio dos Santos – IESS/IDEAL/FV UFSC

Revisão

Lucas do Nascimento – IESS/IDEAL/FV UFSC

Comitê Técnico – Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

Gustavo Pires da Ponte

Guilherme Mazolli Fialho

Aline Couto de Amorim

Michele Almeida de Souza

Paula Monteiro Pereira

Diagramação

GIZ Brasil

Fotografia

Antônio Pereira/Semcom Manaus

O projeto Sistemas de Energia do Futuro integra a Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável e é implementado pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH e pelo Ministério de Minas e Energia com recursos do Ministério Federal da Cooperação Econômica e Desenvolvimento (BMZ) da Alemanha.

Brasília, junho de 2024.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. ANÁLISE DOS RECURSOS ENERGÉTICOS DISPONÍVEIS	6
2.1.1 AVALIAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS E PENETRAÇÃO ENERGÉTICA	9
2.1.2 SELEÇÃO DA COMUNIDADE PARA ANÁLISE.....	11
3. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE MINIRREDES HIBRIDAS.....	11
3.1. ESCOPO, PREMISSAS E CRITERIOS	12
3.1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS	12
3.1.2 ESCOPO DOS ESTUDOS.....	13
3.1.3 PREMISSAS	13
3.2. DADOS E MODELOS	16
3.2.1 CONFIGURAÇÃO DA SUBESTAÇÃO	16
3.2.2 DADOS DOS GERADORES A DIESEL.....	17
3.2.3 DADOS DOS TRANSFORMADORES	17
3.2.4 MODELOS DO REGULADOR TENSÃO/EXCITATRIZ E REGULADOR DE VELOCIDADE/MOTOR	18
3.2.5 MODELO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	19
3.2.6 MODELO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO.....	21
3.3. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	22
3.3.1 IMPACTOS SOBRE A REGULAÇÃO DE TENSÃO	22
3.3.2 IMPACTOS SOBRE A REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA.....	23
3.3.3 MODELAGEM DAS RAMPAS DE GERAÇÃO SOLAR.....	23
4. CENÁRIOS AVALIADOS.....	24
5. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS HIBRIDOS GERADOR DIESEL+FOTOVOLTAICO	25
5.1. FLUXOGRAMA	25
5.2. CASOS ANALISADOS	26
5.2.1 CASO 01.....	27
5.2.2 CASO 09.....	30
6. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS HIBRIDOS GERADOR DIESEL+FOTOVOLTAICO +ARMAZENAMENTO.....	34
6.1. FLUXOGRAMA	35
6.2. ANÁLISES.....	36
6.2.1 CASO 22.....	36
6.2.2 CASO 23.....	38
6.2.3 CASO 24.....	39
7. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui o maior sistema interligado de energia do mundo controlado por um operador central (Sistema Interligado Nacional - SIN), mas algumas regiões do Brasil têm dificuldades geográficas para se conectar a esta rede interligada. Diante dessa situação, o Brasil possui 212 sistemas isolados que formam o chamado SISOL. Tradicionalmente, esses sistemas isolados têm sido atendidos principalmente por UTEs com motores a diesel acoplados a geradores síncronos (RIBEIRO et al., 2012; ASENSIO; CONTRERAS, 2014). Os custos iniciais de implantação desses geradores a diesel são baixos, além de serem fáceis de operar, instalar e descomissionar, tornando viável a realocação dos geradores a diesel para outro local após o término do contrato de fornecimento.

No entanto, sistemas isolados muitas vezes estão localizados longe dos centros de distribuição e em áreas com barreiras geográficas naturais (topografia, vegetação e hidrologia) e infraestrutura de transporte precária, fatores que encarecem o fornecimento de diesel, resultando em custos mais elevados. As equipes de operação e manutenção (O&M) necessárias para operar essas UTEs também têm um alto custo fixo, encarecendo ainda mais essa energia.

Além disso, a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e o ruído dos geradores a diesel da UTE ainda trazem impactos ambientais e sociais. Em suma, o fornecimento de energia elétrica em sistemas tradicionalmente isolados é extremamente dependente de fontes de energia não renováveis que não estão disponíveis no ponto de consumo, além de apresentar elevados custos de operação e manutenção. (PINHO et al., 2008; SOARES, 2008; ELETROBRAS, 2014; SALAS et al., 2015; HIGUERA, 2017).

Nos últimos anos, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) incentivou soluções alternativas na tentativa de reduzir o consumo de diesel para geração de energia em sistemas isolados. Ao mesmo tempo, o custo de equipamentos fotovoltaicos (PV) e sistemas de armazenamento de energia (ESS) caiu significativamente na última década devido à produção em massa, inovação tecnológica e incentivos governamentais (BHATTACHARYYA; PALIT, 2016; Kaflaq, 2018; Goldie -Scott, 2019). A combinação desses eventos favorece a implantação de usinas híbridas FV+diesel, FV+bateria+diesel ou FV+bateria para alimentação de sistemas isolados, tornando-as cada vez mais competitivas nesse ambiente. (RÜTHER et al., 2000;

RÜTHER, 2003; ABREU et al., 2003; BEYER et al., 2003; COLLE et al., 2004; GONZÁLEZ et al., 2018).

Este documento visa avaliar os impactos na rede elétrica local de cenários de alta penetração de energia renovável intermitente, dimensionando as fontes e avaliando os impactos de inserção dessa geração no sistema.

2. ANÁLISE DOS RECURSOS ENERGÉTICOS DISPONÍVEIS

Conforme apresentado no **PRODUTO 9**, foram levantadas e mapeadas todas as características dos sistemas isolados brasileiros, incluindo os recursos disponíveis. Todavia, para uma exploração direta dos recursos são avaliados os principais recursos disponíveis na região.

O mapa do potencial eólico brasileiro para uma altura de 50 metros (**FIGURA 1**) revela que a região amazônica, exceto o nordeste de Roraima, possui baixa velocidade de ventos, inviabilizando projetos de energia eólica nessa área.



FIGURA 1 - MAPA DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO - 50M

Por outro lado, ao avaliar o atlas solarimétrico nacional (**FIGURA 2**), observa-se que, apesar de a região amazônica não possuir a maior irradiação do Brasil, apresenta uma média anual expressiva, com um valor mínimo de 4 kWh/m².dia.

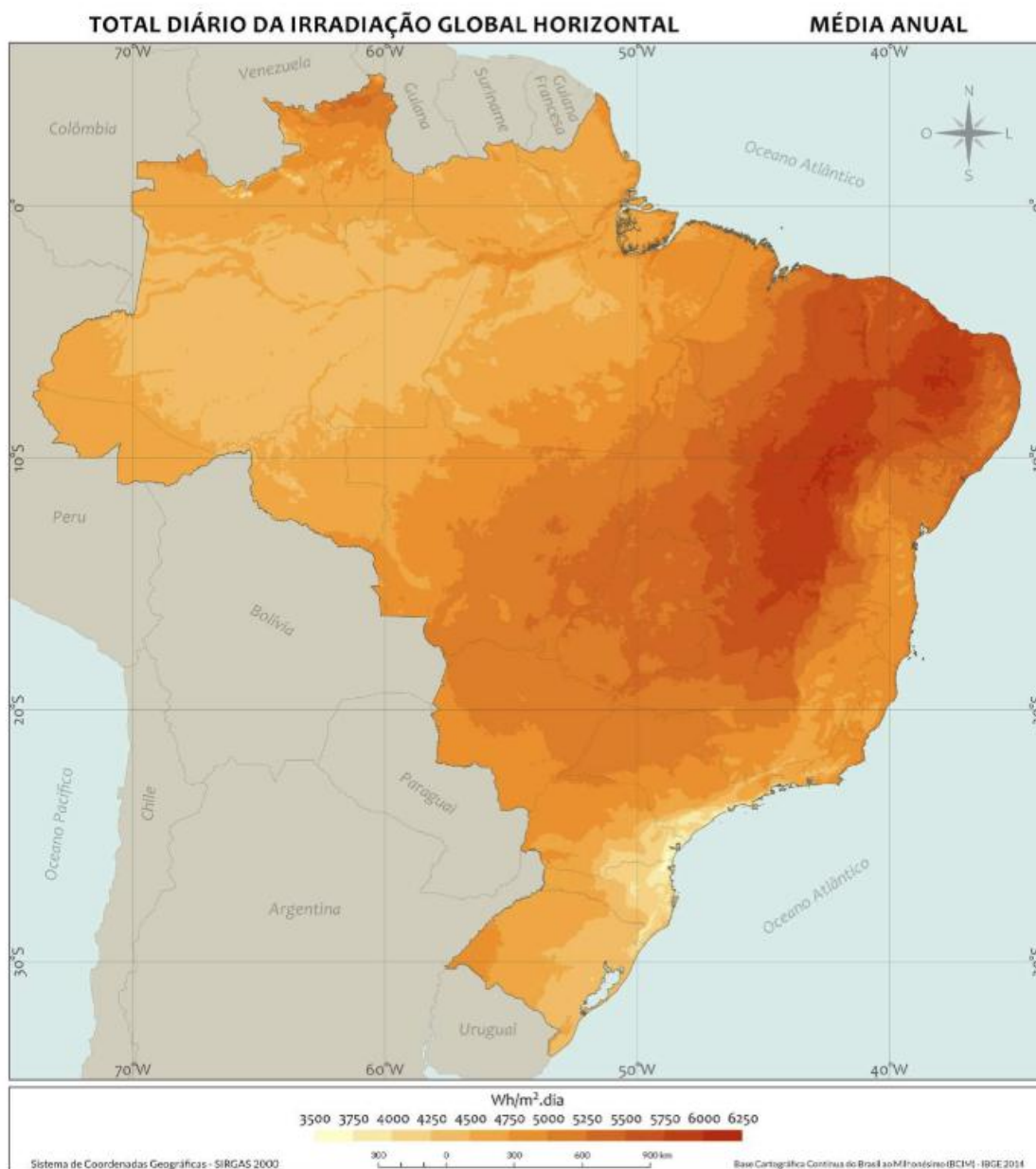


FIGURA 2 - ATLAS SOLARIMÉTRICO BRASILEIRO - GHI - MÉDIA ANUAL

Para o uso de resíduos sólidos, o **PRODUTO 9** apresentou uma análise exhaustiva do tema. Observou-se que as comunidades analisadas possuem uma quantidade insuficiente de resíduos para a produção de energia elétrica. A **FIGURA 3** apresenta as cidades que possuem capacidade de geração elétrica proveniente de resíduos sólidos superior à sua demanda. Além

disso, como dificuldade encontrada, foi constatado a falta de infraestrutura que inviabiliza o uso desse potencial a médio e curto prazo.

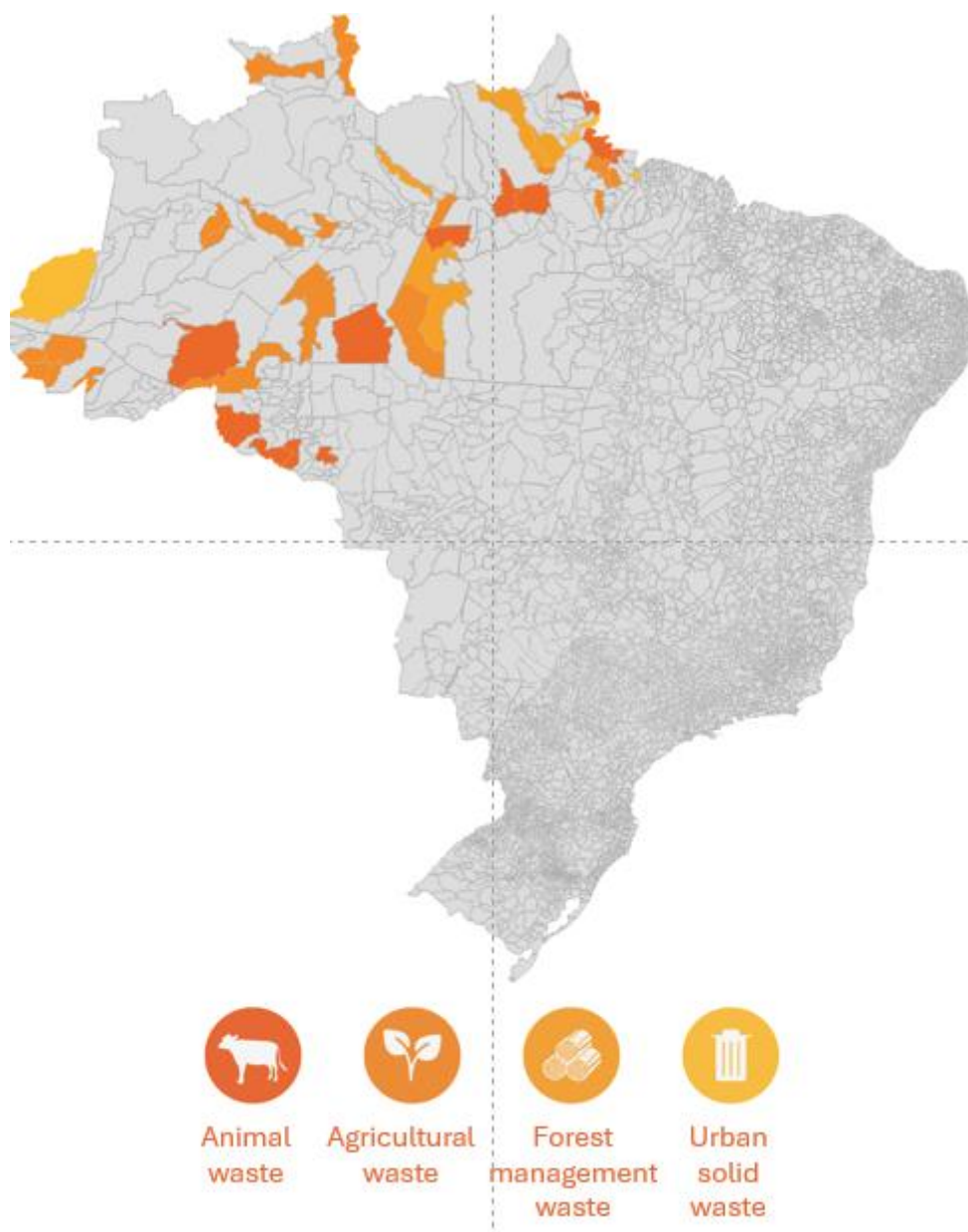


FIGURA 3 - CIDADES COM CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA PROVENIENTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS SUPERIOR À DEMANDA.

Quando avaliados a estabilidade elétrica desses sistemas, observa-se que, os sistemas de turbina que utilizam Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) demonstram uma vantagem significativa em termos de robustez e estabilidade elétrica comparados aos geradores a diesel, tanto de pequeno quanto de grande porte. A maior inércia das turbinas RSU permite uma capacidade superior de absorver e reagir a variações súbitas de carga, resultando em menor flutuação de frequência e tensão.

2.1.1 AVALIAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS E PENETRAÇÃO ENERGÉTICA

Para os estudos energéticos, foram considerados sistemas híbridos compostos por geração fotovoltaica (FV), geradores a diesel e sistemas de armazenamento de energia (BESS). A análise dos sistemas FV+Gerador Diesel+BESS revelou que a penetração energética nas comunidades de Sacambu, Oiapoque e Fernando de Noronha é similar, independentemente da demanda máxima (**FIGURA 4**, **FIGURA 5** e **FIGURA 6**).

		Penetração de potência fotovoltaica											
		10%	15%	20%	30%	40%	50%	100%	200%	300%	400%	500%	1000%
Horas de autonomia do sistema de armazenamento	00:00h	1%	2%	3%	5%	7%	9%	14%	17%	20%	22%	32%	32%
	00:15h	2%	3%	4%	6%	8%	10%	15%	19%	21%	23%	25%	33%
	00:30h	2%	3%	4%	6%	8%	10%	15%	19%	22%	25%	28%	35%
	01:00h	2%	3%	4%	6%	9%	11%	17%	24%	29%	32%	34%	39%
	02:00h	2%	3%	4%	6%	9%	11%	21%	32%	36%	39%	41%	45%
	03:00h	2%	3%	4%	7%	9%	11%	21%	34%	39%	42%	43%	48%
	04:00h	2%	3%	4%	7%	9%	11%	21%	35%	41%	44%	46%	51%
	05:00h	2%	3%	4%	7%	9%	11%	21%	37%	43%	47%	49%	54%
	06:00h	2%	3%	4%	7%	9%	11%	21%	38%	45%	49%	51%	57%
	12:00h	2%	3%	4%	7%	9%	11%	21%	41%	55%	61%	65%	73%
	18:00h	2%	3%	4%	7%	9%	11%	21%	41%	59%	70%	76%	88%
	24:00h	2%	3%	5%	7%	9%	11%	21%	41%	60%	75%	83%	95%
	30:00h	2%	3%	5%	7%	9%	11%	21%	41%	60%	77%	86%	97%
	36:00h	2%	4%	5%	7%	9%	11%	22%	41%	60%	78%	88%	98%
	42:00h	3%	4%	5%	7%	9%	11%	22%	41%	60%	78%	89%	98%
	48:00h	3%	4%	5%	7%	9%	11%	22%	41%	60%	78%	91%	99%
	50:00h	3%	4%	5%	7%	9%	11%	22%	41%	60%	78%	91%	99%
	60:00h	3%	4%	5%	7%	9%	11%	22%	41%	60%	79%	93%	100%
	66:00h	3%	4%	5%	7%	9%	11%	22%	41%	60%	79%	93%	100%
	72:00h	3%	4%	5%	7%	9%	11%	22%	41%	60%	79%	94%	100%

FIGURA 4 – PENETRAÇÃO ENERGÉTICA - SACAMBU

		Penetração de potência fotovoltaica											
		10%	15%	20%	30%	40%	50%	100%	200%	300%	400%	500%	1000%
Horas de autonomia do sistema de armazenamento	00:00h	2%	4%	5%	8%	11%	14%	20%	24%	25%	28%	32%	35%
	00:15h	2%	4%	5%	7%	10%	12%	19%	23%	25%	27%	29%	38%
	00:30h	2%	4%	5%	7%	10%	12%	19%	24%	26%	29%	32%	39%
	01:00h	2%	4%	5%	7%	10%	12%	19%	27%	32%	36%	38%	43%
	02:00h	2%	4%	5%	7%	10%	12%	24%	36%	40%	43%	45%	48%
	03:00h	2%	4%	5%	7%	10%	12%	24%	38%	43%	46%	47%	51%
	04:00h	2%	4%	5%	7%	10%	12%	24%	40%	46%	48%	50%	54%
	05:00h	2%	4%	5%	7%	10%	12%	24%	42%	48%	51%	53%	57%
	06:00h	2%	4%	5%	7%	10%	12%	24%	43%	50%	54%	56%	60%
	12:00h	3%	4%	5%	7%	10%	12%	24%	46%	61%	67%	71%	77%
	18:00h	3%	4%	5%	7%	10%	12%	24%	46%	66%	78%	84%	92%
	24:00h	3%	4%	5%	7%	10%	12%	24%	46%	67%	83%	90%	98%
	30:00h	3%	4%	5%	8%	10%	12%	24%	46%	67%	85%	93%	99%
	36:00h	3%	4%	5%	8%	10%	12%	24%	46%	67%	86%	94%	99%
	42:00h	3%	4%	5%	8%	10%	12%	24%	46%	67%	87%	95%	100%
	48:00h	3%	4%	5%	8%	10%	13%	24%	46%	67%	87%	96%	100%
	50:00h	3%	4%	5%	8%	10%	13%	24%	46%	67%	87%	96%	100%
	60:00h	3%	4%	5%	8%	10%	13%	24%	46%	67%	88%	98%	100%
	66:00h	3%	4%	5%	8%	10%	13%	24%	46%	67%	88%	98%	100%
	72:00h	3%	4%	5%	8%	10%	13%	24%	46%	67%	88%	99%	100%

FIGURA 5 - PENETRAÇÃO ENERGÉTICA - OIAPOQUE

		Penetração de potência fotovoltaica											
		10%	15%	20%	30%	40%	50%	100%	200%	300%	400%	500%	1000%
Horas de autonomia do sistema de armazenamento	00:00h	3%	4%	6%	8%	11%	14%	21%	25%	26%	28%	32%	35%
	00:15h	3%	4%	6%	9%	12%	15%	22%	25%	27%	29%	33%	41%
	00:30h	3%	4%	6%	9%	12%	15%	22%	25%	27%	32%	36%	43%
	01:00h	3%	4%	6%	9%	12%	15%	22%	30%	36%	39%	42%	45%
	02:00h	3%	4%	6%	9%	12%	15%	29%	41%	44%	46%	48%	51%
	03:00h	3%	4%	6%	9%	12%	15%	29%	44%	47%	49%	50%	53%
	04:00h	3%	4%	6%	9%	12%	15%	29%	46%	50%	52%	53%	56%
	05:00h	3%	4%	6%	9%	12%	15%	29%	48%	53%	55%	56%	60%
	06:00h	3%	4%	6%	9%	12%	15%	29%	50%	56%	58%	59%	62%
	12:00h	3%	4%	6%	9%	12%	15%	29%	55%	70%	75%	76%	80%
	18:00h	3%	5%	6%	9%	12%	15%	29%	55%	79%	89%	93%	97%
	24:00h	3%	5%	6%	9%	12%	15%	29%	55%	80%	95%	98%	100%
	30:00h	3%	5%	6%	9%	12%	15%	29%	55%	80%	96%	99%	100%
	36:00h	3%	5%	6%	9%	12%	15%	29%	55%	80%	98%	99%	100%
	42:00h	3%	5%	6%	9%	12%	15%	29%	55%	80%	98%	100%	100%
	48:00h	3%	5%	6%	9%	12%	15%	29%	55%	80%	99%	100%	100%
	50:00h	3%	5%	6%	9%	12%	15%	29%	55%	80%	99%	100%	100%
	60:00h	3%	5%	6%	9%	12%	15%	29%	55%	80%	99%	100%	100%
	66:00h	3%	5%	6%	9%	12%	15%	29%	55%	80%	99%	100%	100%
	72:00h	4%	5%	6%	9%	12%	15%	29%	56%	80%	99%	100%	100%

FIGURA 6 - PENETRAÇÃO ENERGÉTICA – FERNANDO DE NORONHA

Observa-se que, independentemente da demanda máxima das comunidades analisadas, o potencial de penetração energética das combinações de sistemas híbridos permanece próximo em todas as configurações. A FIGURA 7 ilustra a diferença de penetração energética máxima entre as comunidades de Sacambu, Oiapoque e Fernando de Noronha. Verificou-se a máxima que uma diferença média 11,2%. Vale destacar que, nessas análises, não foi avaliada a viabilidade elétrica dessas combinações específicas, focando apenas no potencial de penetração energética.

		Penetração de potência fotovoltaica											
		10%	15%	20%	30%	40%	50%	100%	200%	300%	400%	500%	1000%
Horas de autonomia do sistema de armazenamento	00:00h	0,8%	1,0%	1,5%	1,8%	2,5%	3,4%	4,4%	4,6%	3,9%	4,1%	0,3%	2,0%
	00:15h	0,5%	0,7%	0,9%	1,4%	1,9%	2,4%	3,6%	3,7%	3,6%	3,3%	3,6%	4,3%
	00:30h	0,4%	0,7%	0,9%	1,3%	1,8%	2,4%	3,4%	3,5%	3,1%	3,4%	4,0%	4,0%
	01:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,2%	2,7%	2,9%	3,6%	3,7%	3,8%	3,2%
	02:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,3%	4,6%	4,0%	3,8%	3,6%	3,1%
	03:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	5,1%	4,3%	3,9%	3,6%	2,9%
	04:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	5,5%	4,5%	4,1%	3,8%	2,9%
	05:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	6,0%	4,9%	4,3%	4,0%	3,1%
	06:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	6,5%	5,3%	4,6%	4,1%	3,0%
	12:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	7,8%	8,2%	6,8%	5,7%	3,6%
	18:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	7,7%	11,0%	9,8%	8,4%	4,8%
	24:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	7,7%	11,2%	10,4%	7,5%	2,4%
	30:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	7,7%	11,1%	10,3%	6,2%	1,7%
	36:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	7,7%	11,1%	10,4%	5,6%	1,3%
	42:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	7,7%	11,1%	10,5%	5,2%	0,9%
	48:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	7,7%	11,2%	10,6%	4,9%	0,6%
	50:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	7,7%	11,2%	10,6%	4,8%	0,5%
	60:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	7,7%	11,2%	10,7%	4,1%	0,2%
	66:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	7,7%	11,2%	10,7%	3,7%	0,1%
	72:00h	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,7%	2,1%	4,2%	7,7%	11,2%	10,7%	3,4%	0,0%

FIGURA 7 - DIFERENÇA MÁXIMA ENTRE VALORES DE PENETRAÇÃO ENERGÉTICA A ENCONTRADAS

Diante desses resultados, as análises de estabilidade das minirredes híbridas foram direcionadas para a realização de mais cenários específicos para cada comunidade, considerando a semelhança de comportamento energético. A análise da variação de estabilidade elétrica considera geradores a diesel de pequeno porte devido à sua rápida resposta e características dinâmicas distintas. Esses geradores, embora possuam menor inércia comparados aos de grande porte, são capazes de ajustar a frequência rapidamente, sendo ideais para estudar flutuações de frequência e tensão em condições de carga variável.

2.1.2 SELEÇÃO DA COMUNIDADE PARA ANÁLISE

Visto as características energéticas e do sistema de geração das comunidades. A comunidade de Sacambu-AM foi escolhida para as análises devido à presença de máquinas de pequeno porte, o que permite uma compreensão aprofundada das dinâmicas de resposta rápida e das estratégias necessárias para mitigar instabilidades elétricas em cenários de menor escala. Assim nesse produto será avaliado diversos cenários com variações de geração FV com ou sem armazenamento integrado a geradores diesel.

3. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE MINIRREDES HÍBRIDAS

Para avaliar os impactos na rede isoladas são necessários que sejam atribuídas métricas para avaliar os resultados. A caracterização do que será operacionalmente aceitável, considerado neste trabalho, se fundamenta na observância de critérios em dois patamares de severidade:

A) **Critérios de Qualidade de Energia:** Referem-se aos limites de variações flutuantes de tensão e frequência decorrentes da operação da geração proveniente de fonte renovável intermitente (neste caso geração fotovoltaica). Foram considerados os limites dispostos nos Procedimentos de Rede do ONS como os limites a serem tolerados por gerações híbridas em regime contínuo de operação. Estes limites são aqui tratados como **Critérios de Qualidade de Energia**, que estabelecem os limites permissíveis de perturbação na qualidade da energia fornecida aos consumidores.

B) Limites de Segurança: Referem-se aos limites de variações e tensão ou frequência que possam incorrer em risco de desligamento das unidades geradoras podendo resultar em colapso no fornecimento ao sistema isolado.

A instalação de geração fotovoltaica, como consequência da tecnologia utilizada nos inversores fotovoltaicos, pode resultar em aumento da distorção harmônica da rede elétrica. Como este fator é controlado a nível de fabricação e certificação dos equipamentos, este aspecto, embora de relevante, está fora do escopo da presente análise.

Os estudos apresentam resultados de simulações que avaliam os impactos de variações de potência de uma geração fotovoltaica operando em uma comunidade típica da Amazônia (Utilizando dados de demanda de Sacambu-AM) na frequência e tensão do sistema isolado. Serão avaliados vários níveis de penetração solar verificando-se se os respectivos impactos violam os limites adotados.

3.1. ESCOPO, PREMISSAS E CRITÉRIOS

3.1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

A instalação de fontes de energia renovável em sistema isolados representa um desafio técnico relevante e atual, fortemente motivado por razões econômicas e ambientais. A redução de custos com combustíveis e transporte em longas distâncias para áreas isoladas junto à redução da emissão de gás CO₂ justificam os esforços atuais em buscar a viabilidade técnica de substituição gradativa das fontes térmica por fontes renováveis de baixo custo operacionais e que se alinhem as propostas de conservação do meio ambiente.

As gerações de energia elétrica convencionais provenientes de máquinas rotativas, hidráulicas ou térmicas, são facilmente despacháveis e controláveis, as fontes de energia elétrica renováveis são intermitentes. As variações sazonais são lentas e não representam problemas para os sistemas elétricos que dispõem de sistemas de controles adequados nos geradores a diesel convencionais e demais equipamentos, suficientemente rápidos para compensar plenamente tais variações, desde que disponham de reserva girante para isto. Em síntese, os controles de tensão e velocidades dos geradores diesel são perfeitamente apropriados para controle operacional do sistema frente às variações de geração horária solar, como sempre foram para as variações diárias da carga dos consumidores.

Por outro lado, as variações rápidas da irradiância solar incidentes sobre os módulos fotovoltaicos, decorrentes das variações de nebulosidades, provocam variações flutuantes relativamente rápidas na potência elétrica resultando em variações de tensão e frequência do sistema. Este fato é particularmente crucial em sistema de baixa potência de curto-circuito e reduzida inércia como é o presente caso. Os controles dos geradores a diesel não apresentam velocidade de resposta suficientemente rápida para acompanhar, em tempo apropriado, tais variações, evitando-se excursões elevadas, principalmente de frequência.

Destes fatos, depreende-se, a necessidade de se avaliar tais impactos frente aos recursos existentes de regulação e controle das unidades térmicas existentes, visando estabelecer níveis adequados e seguros de despachos de renováveis.

3.1.2 ESCOPO DOS ESTUDOS

Os estudos de regime permanente do sistema, referidos com estudos de fluxo de carga, representam um momento estático de um dado estado ou ponto de operação do sistema.

A rigor, os sistemas se encontram continuamente variando em função da carga, em passado recente, as únicas variáveis não controláveis do sistema. A regulação de tensão e velocidade das usinas, controles automáticos de geração, OLTC (*On line Tap Changer*) entre outros controles, respondiam satisfatoriamente pelo controle da Dinâmica Operacional do Sistema.

O advento das tecnologias renováveis, eólicas e solares, incorporou ao sistema elétrico fontes de potência elétrica variáveis ampliando significativamente a importância do conceito de Dinâmica Operacional focando o desempenho dinâmico do sistema frente à presença de fontes de perturbações flutuantes, contínuas e normais ao cotidiano operacional do sistema.^[1]

Desta forma, o desempenho dinâmico do sistema, frente a distúrbios de grande porte, como curtos-circuitos, rejeição de grandes blocos de carga, entre outros, são problemas de natureza distinta e não fazem parte do escopo do presente estudo.

3.1.3 PREMISSAS

3.1.3.1 RAMPAS DE VARIAÇÃO DE IRRADIÂNCIA:

Este trabalho tem como objetivo analisar os impactos das variações na irradiância solar e, conseqüentemente, na potência elétrica gerada pela instalação fotovoltaica localizada na

subestação. A análise será baseada em dados de campo apresentados na **Figura 8**, que ilustra as variações típicas de irradiância em intervalos de tempo no contexto brasileiro. O estudo completo pode ser encontrado na referência [2].

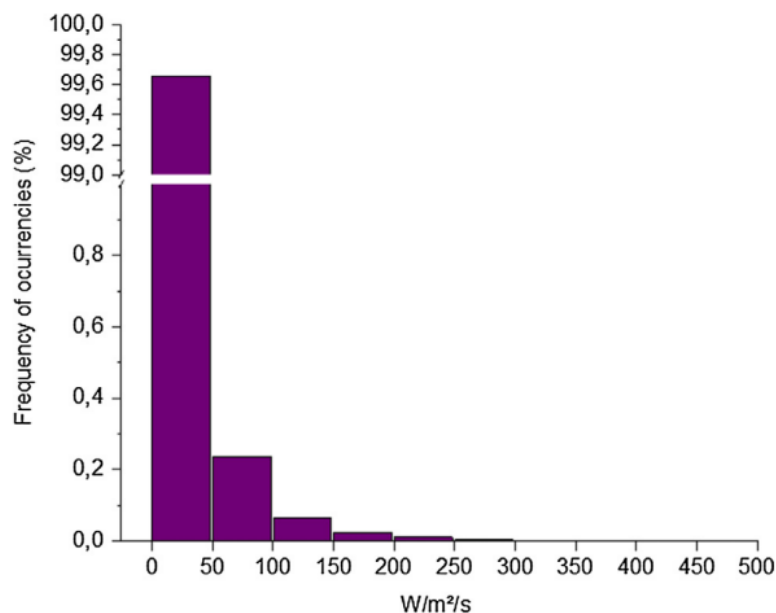


FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE RAMPAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR [2]

Observa-se que praticamente 100% dos eventos são compreendidos na faixa de 0 a 200 W/m²/s. Considerando que a irradiação esperada nos módulos fotovoltaicos é de 1000 W/m²/, ou seja, temos 20% de variação. Portanto esse trabalho adotará, uma taxa de variação de 0,20pu/s do despacho inicial.

Este estudo tem como objetivo avaliar o pior caso em todos os cenários, incluindo a redução da irradiância até 0 W/m². Embora tal situação não ocorra normalmente devido à variação de irradiação causada por nuvens, consideraremos eventos em que possa haver uma falha no sistema de geração fotovoltaica, resultando em uma redução total da geração. Os tempos médios de variação de energia em caso de low-voltage-ride-through (LVRT) são compatíveis com os apresentados no estudo [2].

3.1.3.2 CURVA DE CARGA:

O presente estudo utiliza como base a curva horaria de carga de Sacambu-AM. Portanto, será considerado nas simulações, o valor P95% da curva de carga, em igual a 206kW, verificada no mês de setembro, no período das 11 às 14 horas conforme a **FIGURA 9**.

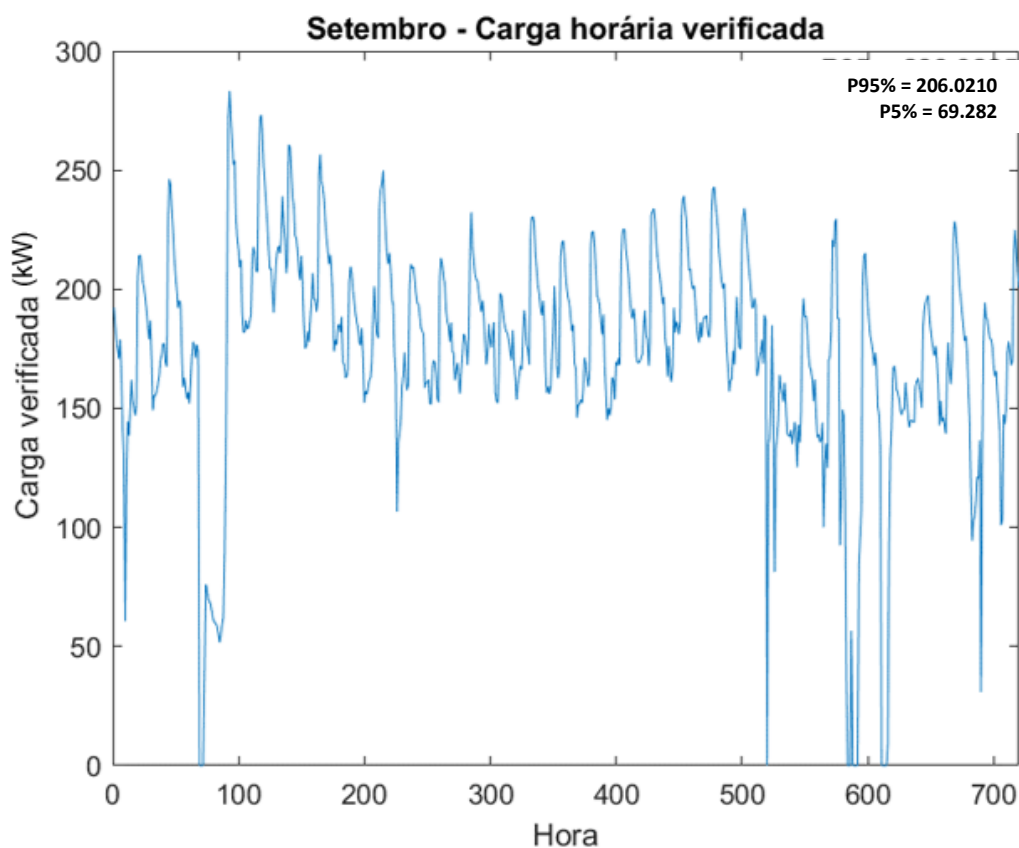


FIGURA 9 - CURVA DE CARGA DE SACAMBU MÊS DE SETEMBRO (720 HORAS DE REGISTRO).

3.1.3.3 DESPACHO DAS UNIDADES DE GERAÇÃO A DIESEL:

As simulações consideraram casos com 4 e 2 unidades geradoras a diesel, e principalmente uma única unidade diesel, expressando uma condição mais desfavorável e de grande probabilidade de ocorrer.

3.1.3.4 PATAMARES DE PENETRAÇÃO ANALISADOS:

Foram analisados vários patamares de penetração solar em ordem decrescente iniciando no valor de 90% até se obter resultados dentro dos critérios adotados. O montante de geração solar, em cada caso, é resultado do remanejamento de igual valor de geração térmica igualmente distribuída entre os geradores diesel.

3.1.3.5 CRITÉRIOS

Como referência para o presente estudo, adotou-se o critério de avaliação os limites:

- Para tensão: Faixa de +/-5% em torno do valor inicial.
- Faixa de frequência de regime contínuo: 58,5Hz a 62,5Hz

A faixa de tolerância de frequência em regime contínuo, utilizada no presente estudo, foi a faixa de frequência definida nos Procedimentos de Rede do ONS [3] para que a geração solar (e eólica) possa ser capaz de operar em regime contínuo. A **FIGURA 10**, transcrita dos Procedimentos de Rede do ONS, ilustra as faixas de variação de frequência apontando a faixa de operação contínua estabelecendo o critério de qualidade de energia adotado neste estudo e a faixa de segurança que, ultrapassada, resultará em desligamento da geração fotovoltaica e possivelmente dos geradores a diesel.



FIGURA 10 - SUPORTABILIDADE DE GERAÇÃO SOLAR PARA VARIAÇÕES DE FREQUÊNCIA

3.2. DADOS E MODELOS

3.2.1 CONFIGURAÇÃO DA SUBESTAÇÃO

A **FIGURA 11** apresenta o diagrama unifilar simplificado da SE Sacambu com 6 unidades térmicas a diesel, sendo uma de reserva. Cada um dos geradores a diesel G1, G2 e G3 se conectam ao barramento 13,8kV através de transformador de 225kVA. Os geradores a diesel G4 e G5 compartilham um único transformador de 500kVA. O gerador a diesel de contingência de 45kVA utiliza um transformador elevador de 45kVA.

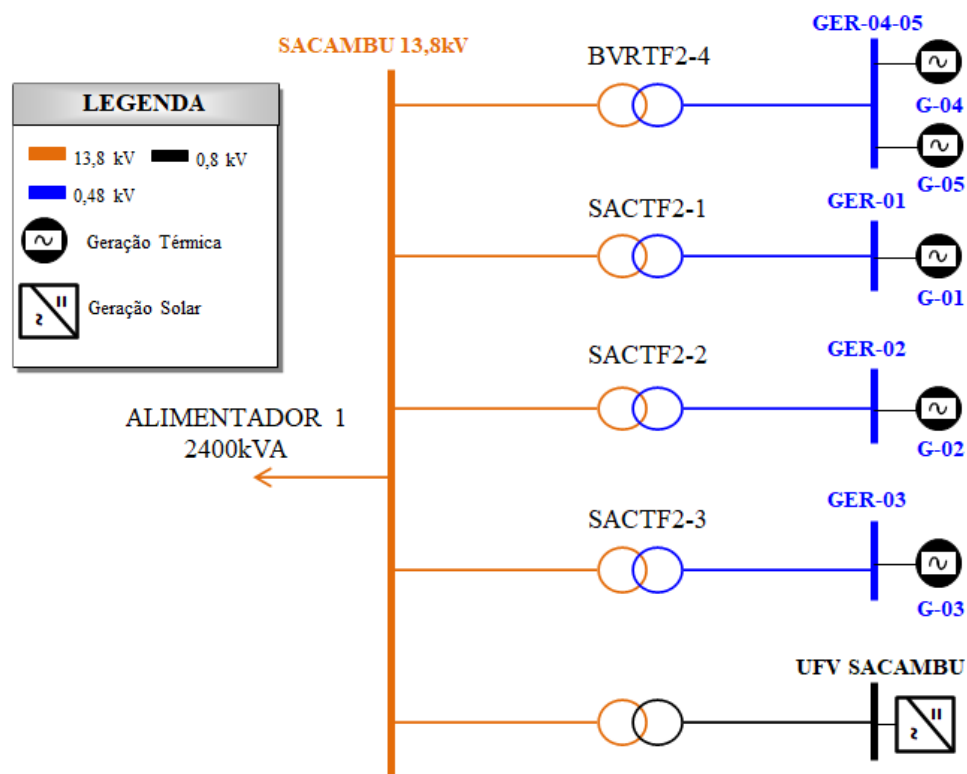


FIGURA 11 - DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO DA UTE SACAMBU COM UMA HIPOTÉTICA UFV.

3.2.2 DADOS DOS GERADORES A DIESEL

Foram utilizados parâmetros elétricos de um gerador a diesel semelhante, (TABELA 1), acionado por motor diesel de potência superior. Dada a similaridade técnica deste gerador com os geradores da rede isolada, considera-se que os parâmetros em “pu” sejam razoavelmente próximos.

3.2.3 DADOS DOS TRANSFORMADORES

Os transformadores de 225kVA (SACTF2-1, SACTF2-2 e SACTF2-3) têm reatância de dispersão igual a 10,55% (base 225kVA) enquanto para o transformador BVRTF2-4 a reatância de dispersão é 4,75% (500kVA).

TABELA 1 - PARÂMETROS ELÉTRICOS DOS GERADORES A DIESEL

Descrição	Notação	Unidade	Valor
Rated terminal voltage	U_N	kV	0,480
Fator de potência nominal	$\cos\phi$	-	0.8
Frequência nominal	f_N	Hz	60
Velocidade nominal	n	rpm	1800
Constante de tempo de circuito aberto transitório no eixo direto	T'_{do}	s	3.68
Constante de tempo de circuito aberto subtransitório no eixo direto	T''_{do}	s	0.0054
Constante de tempo de circuito aberto transitório no eixo de quadratura	T'_{qo}	s	NA
Constante de tempo de circuito aberto subtransitório no eixo de quadratura	T''_{qo}	s	0.0096
Reatância síncrona no eixo direto (não saturada)	x_d	pu	3.16
reatância síncrona no eixo de quadratura (não saturada)	x_q	pu	1.56
Direct-axis transient reactance (unsat.) (unsat.)	x'_d	pu	0.221
Quadrature-axis transient reactance (unsat.) $x'_q = x_q$ for salient pole	x'_q	pu	0.319
Direct-axis subtransient reactance (unsat.)	x''_d	pu	0.149
Leakage reactance (Stator)	x_e	pu	0,070-
Stator resistance per phase 0.00093 ohm/phase resistance	R_a	Ohm	0.0031

3.2.4 MODELOS DO REGULADOR TENSÃO/EXCITATRIZ E REGULADOR DE VELOCIDADE/MOTOR

A FIGURA 12 mostra o modelo de regulador de velocidade e motor utilizado nas simulações, tendo os seguintes parâmetros:

- $T_I=0,04s$;
- $T_F=0,004s$;
- $EP=0,05$;
- $K=1,0$;
- $KPGOV=0,30$;
- $KIGOV=0,20$;
- $TACT=1,5s$;
- $TB=1,5s$;
- $KENG=0,70$;
- $PMIN=0,0$ pu;
- $PMAX=1,0$ pu

A FIGURA 13 mostra o modelo de regulador de tensão e excitatriz utilizado nas simulações, tendo os seguintes parâmetros:

- $TR=0,02s$;
- $XC=0,02s$;
- $VP=10,0$;
- $KB=1,0$;
- $TB=0,30$;
- $TE=0,80$;

- $T_I=2,0s$;
- $T_B=1,5s$;
- $K_{CEIS}=5,0$;
- $K_{CEIL}=0,0$

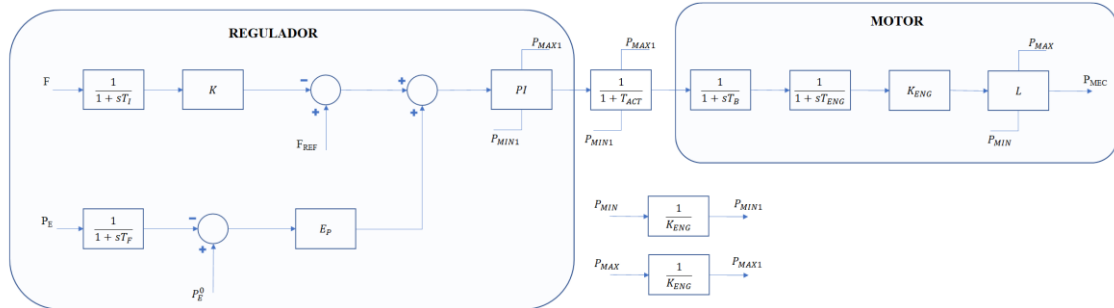


FIGURA 12 DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE (SPEED GOVERNOR) E MOTOR.

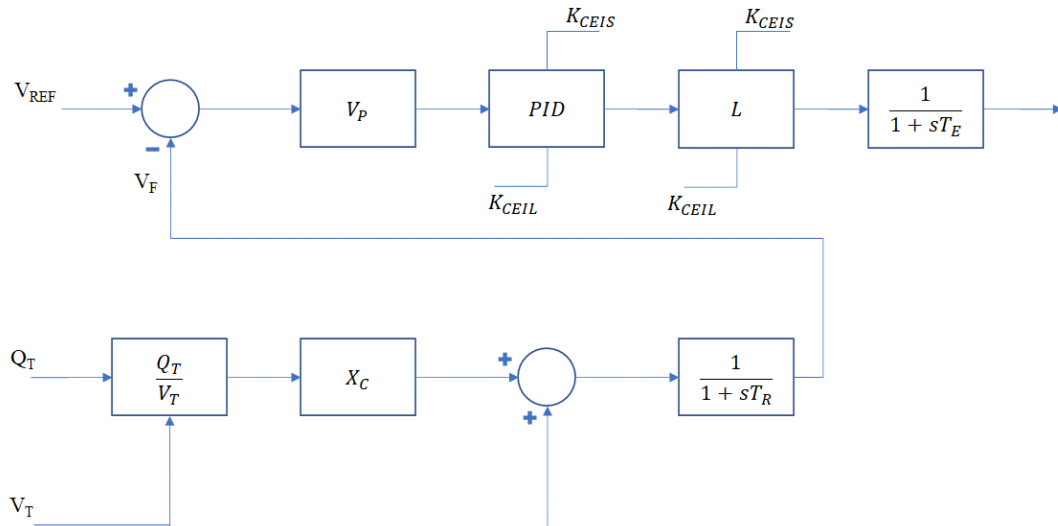


FIGURA 13 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE CONTROLE DA EXCITAÇÃO (REGULADOR DE TENSÃO E EXCITATRIZ).

3.2.5 MODELO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Nas simulações, foi utilizado um modelo real de inversor fotovoltaico do banco de dados do ONS. Na realidade o modelo do conversor tem a única função de produzir a rampa de potência que representa a rampa de irradiância. O modelo dinâmico da usina fotovoltaica (apresentado na **FIGURA 14**) definido para as simulações possui uma e funcionalidades representadas. Ele é implementado no programa ANATEM e possui código aberto em formato CDU

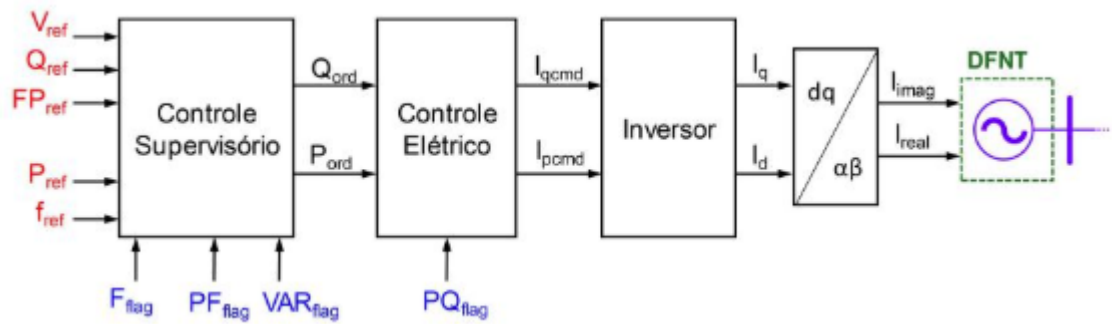


FIGURA 14 - MODELO DO INVERSOR FOTOVOLTAICO

O código CDU (Controlador Definido pelo Usuário) para o modelo dinâmico de uma usina fotovoltaica estão definidos abaixo com suas principais componentes e suas funções:

Bases do Sistema

- **DEFPAR #BSIS 1.0:** Define a base de potência aparente do sistema em MVA.
- **DEFPAR #NCONV 1.00:** Define o número de inversores.

Controle de Potência Reativa

- **DEFPAR #Tp 0.02:** Parâmetro de tempo para controle de potência reativa.
- **DEFPAR #Kqi 0.1:** Ganho integral para o controle de potência reativa.

Controle de Frequência

- **DEFPAR #Tpf 0.05:** Parâmetro de tempo para controle de frequência.
- **DEFPAR #Kpg 0.10:** Ganho proporcional para controle de frequência.
- **DEFPAR #Kig 0.05:** Ganho integral para controle de frequência.
- **DEFPAR #Tg 0.10:** Parâmetro de tempo para controle geral.

Limites e Faixas Operacionais

- **DEFPAR #Femax 999.** e **DEFPAR #Femin -999.:** Limites máximos e mínimos de frequência.
- **DEFPAR #Pmin -999.** e **DEFPAR #Pmax 999.:** Limites máximos e mínimos de potência.
- **DEFPAR #fdb1 0.00** e **DEFPAR #fdb2 0.00:** Faixas mortas para frequência.
- **DEFPAR #Ddn 20.0:** Taxa de regulação para redução de frequência.
- **DEFPAR #Dup 0.0:** Taxa de regulação para aumento de frequência.
- **DEFPAR #Fflag 0.00:** Flag para controle de potência constante ou controle de frequência.

Controle de Fator de Potência e Potência Reativa

- **DEFPAR #FPmin 0.8** e **DEFPAR #FPmax 1.0:** Limites do fator de potência.

- **DEFPAR #PFAFL 0.00:** Flag para selecionar controle de fator de potência constante ou controle de potência reativa constante.
- **DEFPAR #VARFL 0.00:** Flag para selecionar controle de potência reativa constante ou controle remoto.
- **DEFPAR #Qmin -1.00 e DEFPAR #Qmax 1.00:** Limites para potência reativa.

Cálculo de Correntes

- **DEFPAR #Kpq1 0.00 e DEFPAR #Kiq1 0.33:** Ganhos para o cálculo de corrente reativa.
- **DEFPAR #VRFmn 0.899 e DEFPAR #VRFmx 1.101:** Limites de referência de tensão.
- **DEFPAR #Kpv1 0.00 e DEFPAR #Kiv1 50.0:** Ganhos para controle de tensão.

3.2.6 MODELO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO

Análises de estabilidade elétrica, especialmente em condições de transitórios eletromecânicos que duram no máximo alguns segundos, não requerem a modelagem da bateria, mas sim do inversor ao qual ela está conectada. O conversor bidirecional BIW750 da WEG, representado pelo modelo ANATEM VE08. Este modelo integra funções sofisticadas de controle para a injeção e absorção de potência ativa e reativa, permitindo uma operação eficiente e adaptável às condições da rede elétrica. O BIW750 opera em diversos modos de controle de potência reativa, tensão e fator de potência, proporcionando flexibilidade ao sistema. Durante condições de distúrbios na rede, como afundamentos e elevações transitórias de tensão (LVRT/HVRT), o conversor ajusta automaticamente suas operações para manter a estabilidade e proteger os componentes.

A estrutura do modelo é modular, composta por um gerador estático, controle elétrico, controle de distúrbios, limitadores e proteções integradas, garantindo uma operação segura e eficiente (conforme apresentado na **FIGURA 15**).

Adicionalmente, o modelo permite a conexão com controladores de potência externos (PPC), o que amplia ainda mais sua flexibilidade e capacidade de integração em diferentes cenários de operação de sistemas BESS. Essa característica facilita a coordenação entre o conversor e outros componentes do sistema, otimizando a gestão da energia armazenada e fornecida.

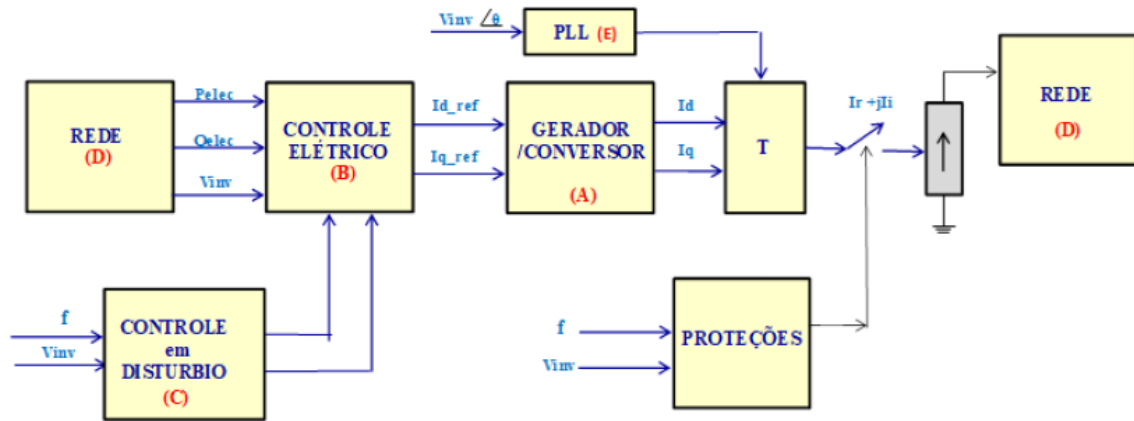


FIGURA 15 - CONVERSOR BIW750

3.3. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

3.3.1 IMPACTOS SOBRE A REGULAÇÃO DE TENSÃO

Os impactos decorrentes das variações de irradiância/potência elétrica injetadas na rede, se manifestam como variações de tensão e frequência que não devem violar os limites definidos como aceitáveis.

Aproximadamente, pode-se estabelecer a relação em variações de tensão em função de variações de potências ativa e reativa injetadas num barramento [4].

$$\Delta V = \frac{1}{S_{cc}} \cdot \Delta Q + \frac{R}{X} \cdot \frac{1}{S_{cc}} \cdot \Delta P$$

Sendo, todas variáveis em “pu”:

S_{cc} = potência de curto-circuito trifásica do barramento;

R = Resistência de curto-circuito;

X = Reatância de curto-circuito;

ΔP = Variação de potência ativa;

ΔQ = Variação de potência reativa.

Com os parâmetros utilizados para a rede isolada, a potência de curto-circuito no barramento 13,8kV é da ordem de 9MVA sendo a relação R/X inferior a 0,2.

Dos valores acima, depreende-se que a influência de variações de potência ativa sobre as tensões são muito reduzidas e podem ser desprezíveis. Concomitantemente, os inversores fotovoltaicos, possíveis causadores de variações rápidas de potência ativa devido as variações da irradiância, também dispõem de funções de controle de tensão que atuam de forma muito rápidas. Em síntese, além das variações de potência ativa terem pouca influência sobre as tensões, o controle rápido de tensão dos inversores, além dos próprios reguladores de tensão dos geradores a diesel contribuem para praticamente tornar sem importância a análise deste problema.

Desta forma, a avaliação dos impactos das variações de potência elétrica resultantes das variações de irradiância no caso de Sacambu, é focada essencialmente nas respectivas variações de frequência.

3.3.2 IMPACTOS SOBRE A REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA

Os reguladores de velocidade das unidades geradoras a diesel realizam a regulação primária de frequência garantindo continuamente o restabelecimento do equilíbrio potência gerada e carga do sistema mantendo a frequência dentro de faixas estreitas. Este controle é especialmente importante em sistemas isolados para garantir uma boa regulação de frequência frente às variações normais da carga no cotidiano operacional.

Entretanto, para sistemas com geração fotovoltaica, a resposta do controle primário (reguladores de velocidade e motor) pode não ser suficientemente rápida para assegurar uma regulação de frequência aceitável dentro de faixa de valores apropriadas. Como a taxa inicial de variação da frequência, logo após a ocorrência do desequilíbrio carga/geração é inversamente proporcional à inércia equivalente do sistema, destacamos a importância da inércia presente do número de máquinas sincronizadas.

3.3.3 MODELAGEM DAS RAMPAS DE GERAÇÃO SOLAR

Sendo o foco da presente análise os valores máximos de variação de frequência, dispensa-se a realização de simulações cobrindo várias variações sucessivas ao longo de um certo período. A simulação de interesse resume-se, pois, a análise da variação máxima da

frequência frente a rampas de geração solar nas condições mais críticas. Um mapeamento dos resultados nas condições mais críticas proporciona elementos para decisão da máxima penetração solar em função de limites considerados.

Para simular as rampas de geração fotovoltaica, foi utilizado o modelo de inversor, onde se aplica uma entrada tipo rampa no “setpoint” de potência ativa. O próprio modelo do inversor tem ativadas suas proteções de sobrefrequência e subfrequência conforme os Procedimentos de Rede.

4. CENÁRIOS AVALIADOS

Visto a complexidade da implementação de energia renovável intermitente na minirrede serão considerados 24 casos conforme a **TABELA 2**.

TABELA 2 – IMPLEMENTAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL INTERMITENTE

Caso	Quantidade de geradores	Geração FV	Geração térmica	Sistema de armazenamento
1	5	185 kW	21kW	Não
2	5	165 kW	21kW	Não
3	5	144 kW	21kW	Não
4	5	123 kW	21kW	Não
5	5	103 kW	21kW	Não
6	5	82 kW	21kW	Não
7	5	62 kW	21kW	Não
8	5	41 kW	21kW	Não
9	3	185 kW	41,2 kW	Não
10	3	165 kW	41,2 kW	Não
11	3	144 kW	41,2 kW	Não
12	3	123 kW	41,2 kW	Não
13	3	103 kW	41,2 kW	Não
14	3	82 kW	41,2 kW	Não
15	3	62 kW	41,2 kW	Não

16	3	41 kW	41,2 kW	Não
17	2	84 kW	150 kW	Não
18	2	70 kW	150 kW	Não
19	2	47 kW	150 kW	Não
20	2	35 kW	150 kW	Não
21	2	23 kW	150 kW	Não
22	1	166 kW	34 kW	Sim
23	1	166 kW	180 kW	Sim
24	1	166 kW	180 kW	Sim

5. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS GERADOR DIESEL+FOTOVOLTAICO

5.1. FLUXOGRAMA

A **FIGURA 16** mostra o fluxograma de uma condição extremamente severa com alta penetração de geração solar. A partir desta condição, adota-se redução de geração solar até se obter resultados que não violem os limites (essa condição hipotética desconsidera os limites de operação do gerador a diesel). **FIGURA 17** mostra o fluxograma numa condição de baixa penetração de geração solar. A **FIGURA 18** mostra o fluxograma numa condição de média penetração de geração solar.

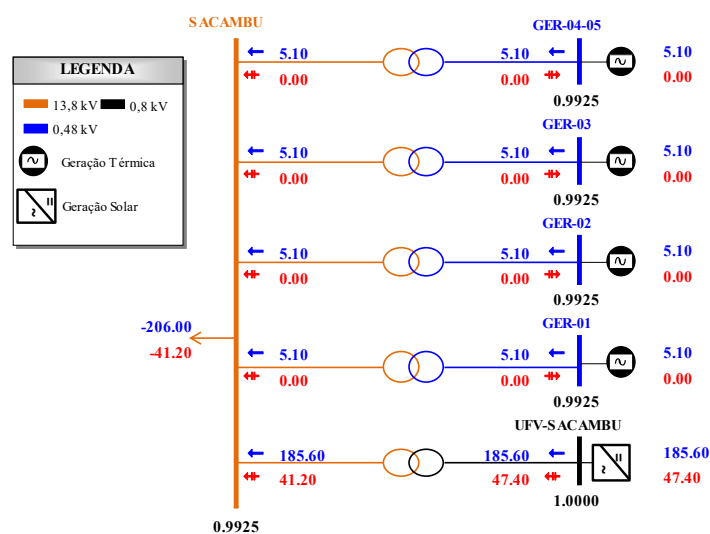


FIGURA 16 - CASO DE ALTA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO SOLAR - FLUXOGRAMA DA SE SACAMBU COM 5 GERADORES DESPACHADOS COM 5kW E UMA UFV ATENDENDO A 90% DA CARGA.

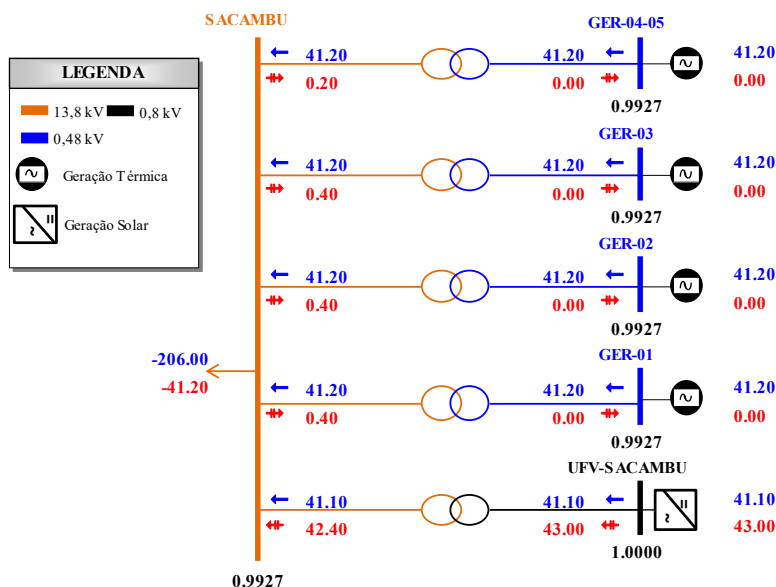


FIGURA 17 - CASO DE BAIXA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO SOLAR - FLUXOGRAMA DA SE SACAMBU COM 5 GERADORES DESPACHADOS COM 41,2kW E UMA UFV ATENDENDO A 20% DA CARGA.

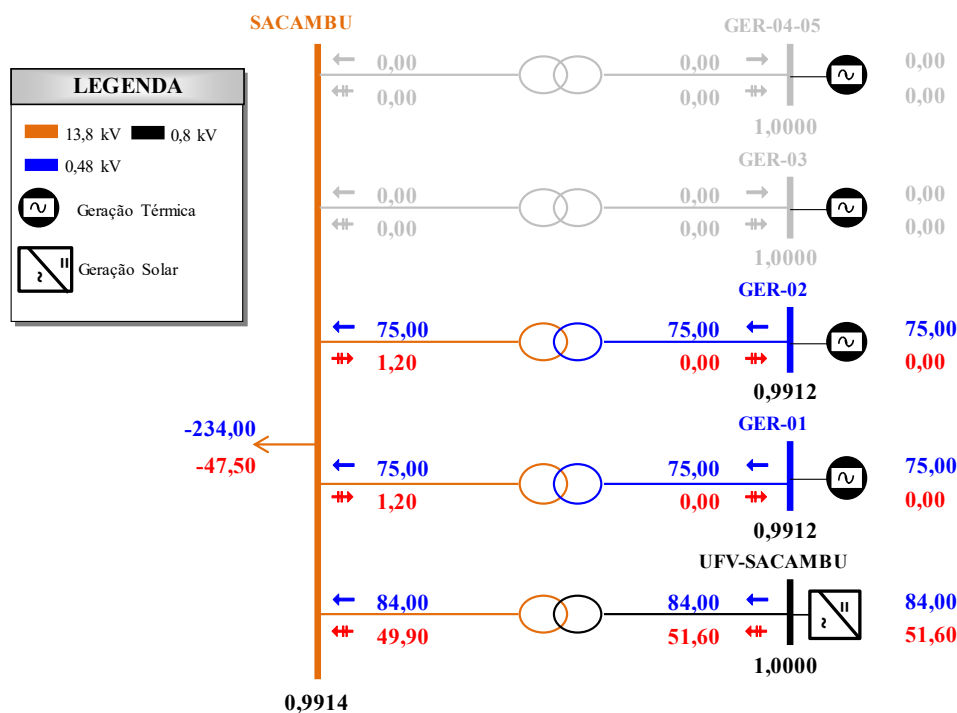


FIGURA 18 – CASO DE MÉDIA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO SOLAR - FLUXOGRAMA DA SE SACAMBU COM 2 GERADORES DESPACHADOS COM 75kW (35%) E UMA UFV ATENDENDO A 36% DA CARGA.

5.2. CASOS ANALISADOS

Foram simulados casos considerados mais críticos partindo-se de valor mais alto para mais baixo até encontrar um patamar sem violação dos critérios. Uma redução de potência devido à redução rápida da irradiação, deve não resultar em redução total da potência, mas,

certamente um valor sustentado pela radiação difusa existente mesmo com a cobertura de nuvens. Foi considerado uma contribuição da irradiância difusa igual a 10% ou 20% do valor inicial.

Foram simulados dois conjuntos de casos, com 5 geradores a diesel (casos 01 a 08) e com 3 geradores a diesel (casos 09 a 16). Os dois geradores a diesel em paralelos no mesmo barramento de baixa tensão foi representado como um equivalente. Por esta razão, tratando-se de casos de simulação, nos referimos como simulações de grupo de 4 geradores a diesel e grupo de 2 geradores a diesel.

5.2.1 CASO 01

Geração solar igual a 185kW, 90% da carga, geração térmica de 21kW. Rampa decrescente de geração solar de 20%/s. Observado na **FIGURA 19**.

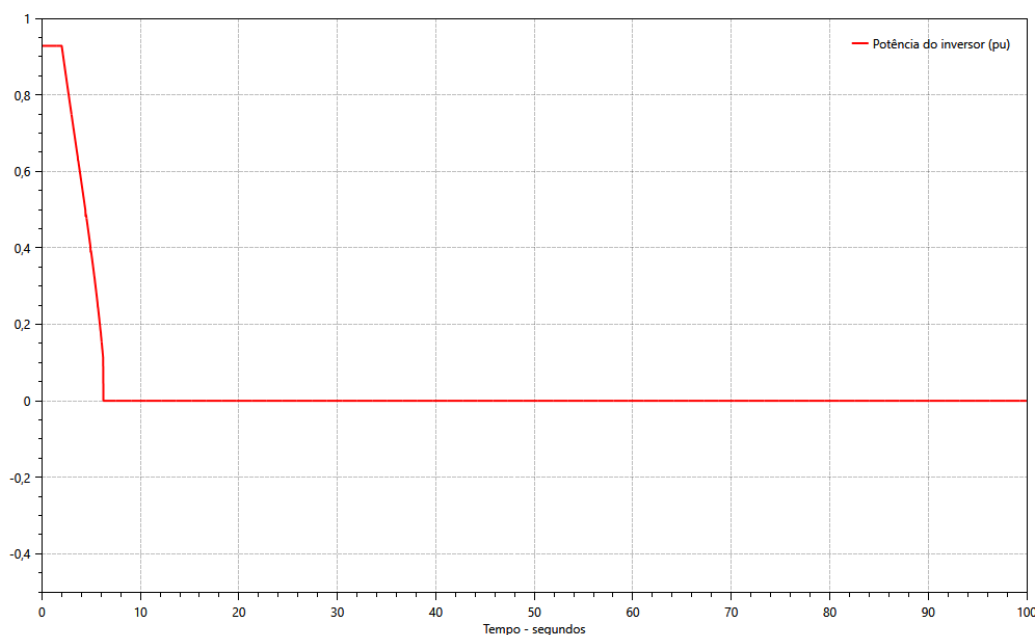


FIGURA 19 - RAMPA DE GERAÇÃO DO INVERSOR SOLAR — RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 90%.

Neste caso, a frequência atinge um valor mínimo de 52,9Hz (**FIGURA 20**) provocando o desligamento do próprio inversor por proteção instantânea de subfrequência. Destaca-se que se a redução se limitasse a 10% a frequência mínima seria 56,2Hz não violando o critério de segurança.

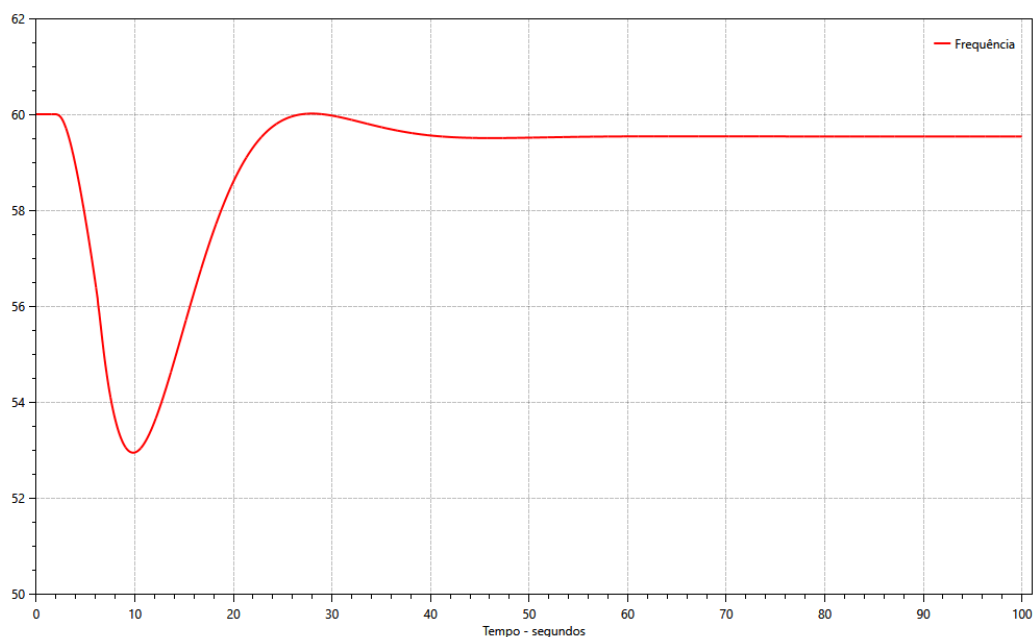


FIGURA 20 - VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA- – RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 90%.

Se a magnitude da rampa não fosse menor do que 20%, o afundamento seria de 56,6Hz. Estes patamares seriam, hipoteticamente, o nível de geração solar remanescente, associado a irradiância difusa. A observação simples de várias rampas de geração solar (potência) registradas em campo, sugere que as reduções de geração solar rápidas não alcançam o valor zero em virtude da contribuição da radiação difusa, sendo este um caso hipotético extremo.

A Figura 21 mostra a potência mecânica de um dos geradores diesel assumindo a geração solar decrescente. Destaca-se que a taxa de tomada de carga (na verdade, de geração) do gerador diesel é mais lenta do que a redução da geração solar, fato responsável pelo afundamento transitório da frequência e que limita o nível de penetração solar.

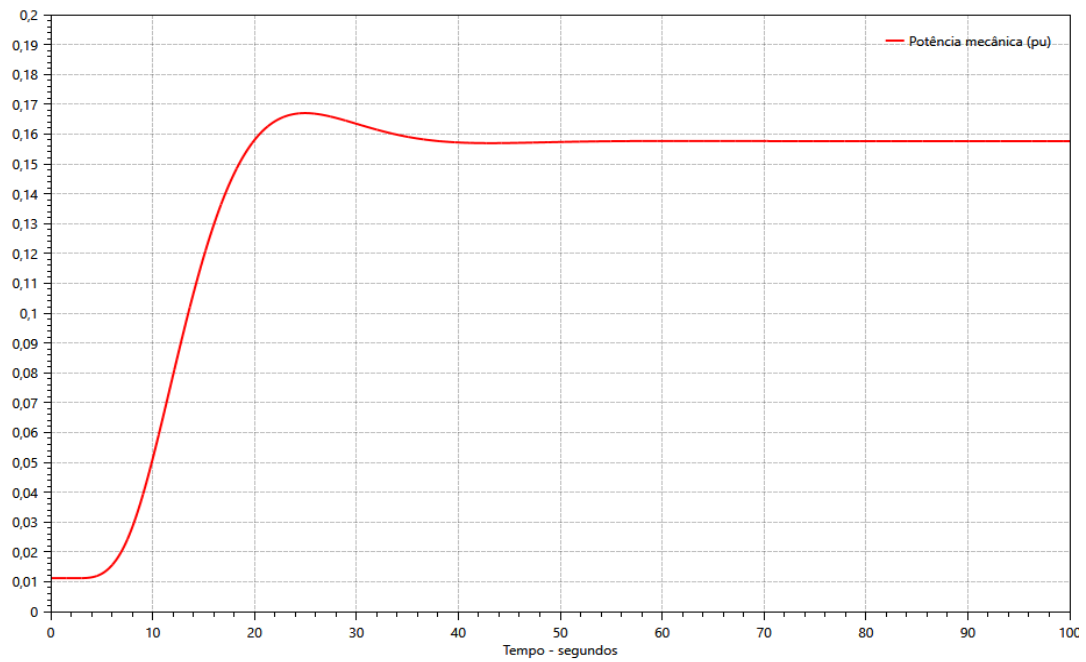


FIGURA 21 - POTÊNCIA MECÂNICA DE UM GERADOR- – RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 90%.

A FIGURA 22 mostra a variação insignificante de tensão no barramento Sacambu 13,8kV. A variação de 2% da Figura 4.3.d resulta do desligamento do inversor.

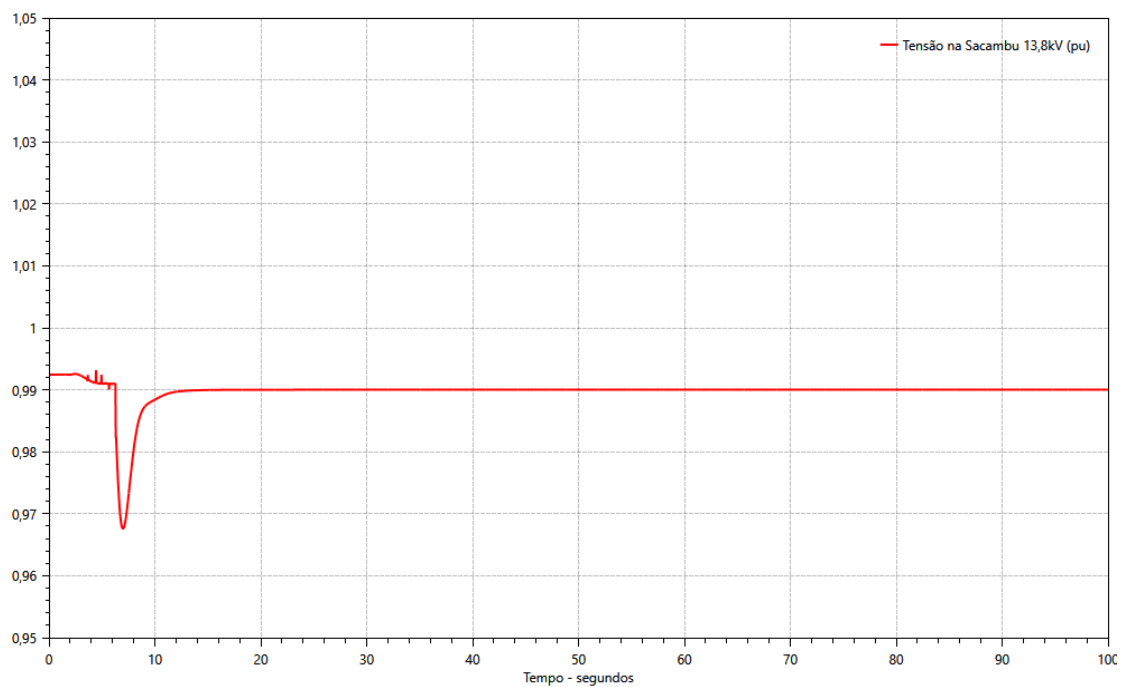


FIGURA 22 - VARIAÇÃO DA TENSÃO SACAMBU 13,8kV- – RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 90%.

5.2.1.1 CASO 02 a CASO 08

O resumo dos valores encontrados para os Casos 02 até o Caso 08 se encontram na **TABELA 3**. Os valores indicados com fundo vermelho destacam a violação do critério de segurança, isto é, haverá desligamento da própria geração solar e muito provável dos geradores diesel causando um desligamento total do sistema. Os valores em fundo amarelo indicam violação do critério de qualidade apenas, enquanto os de fundo verde indicam que não houve violação de nenhum dos critérios adotados.

TABELA 3 - CASOS DE SIMULAÇÃO COM 5 GERADORES, DESPACHADOS INICIALMENTE COM 5,1kW CADA.

Caso	Geração Solar (% da pot. da carga)	Frequência mínima observada com 5 geradores (Hz)		
		Irradiação difusa (% da pot. despachada)		
		0	10	20
1	90	52,9	56,2	56,6
2	80	53,8	56,5	56,9
3	70	54,5	56,9	57,3
4	60	55,2	57,3	57,6
5	50	56,4	57,4	57,8
6	40	57,5	58	58,3
7	30	57,8	58,5	58,7
8	20	58,6	59	59,1

5.2.2 CASO 09

Geração solar igual a 41,1kW, 20% da carga, geração térmica de 41,2kW. Rampa decrescente de geração solar de 20%/s.

Neste caso, a frequência atinge um valor mínimo de 58,6Hz (**FIGURA 23**) que atende ao critério de qualidade aqui adotado.

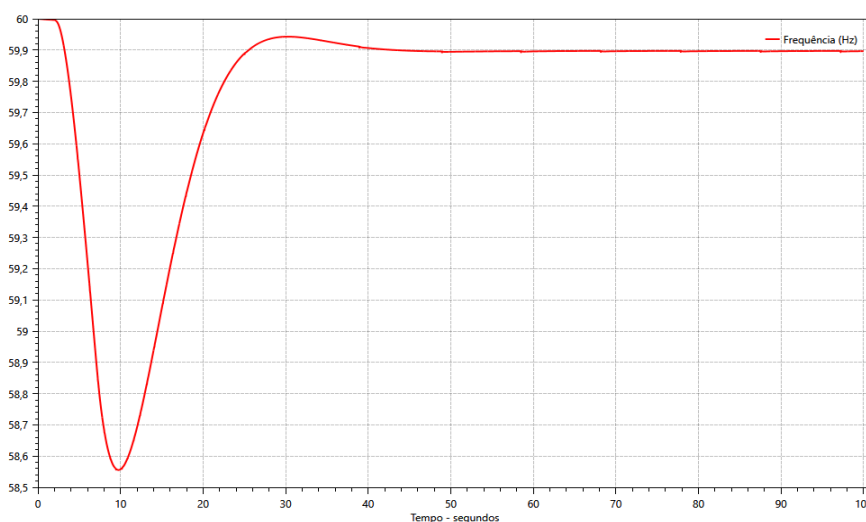


FIGURA 23 - VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA - RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 20%.

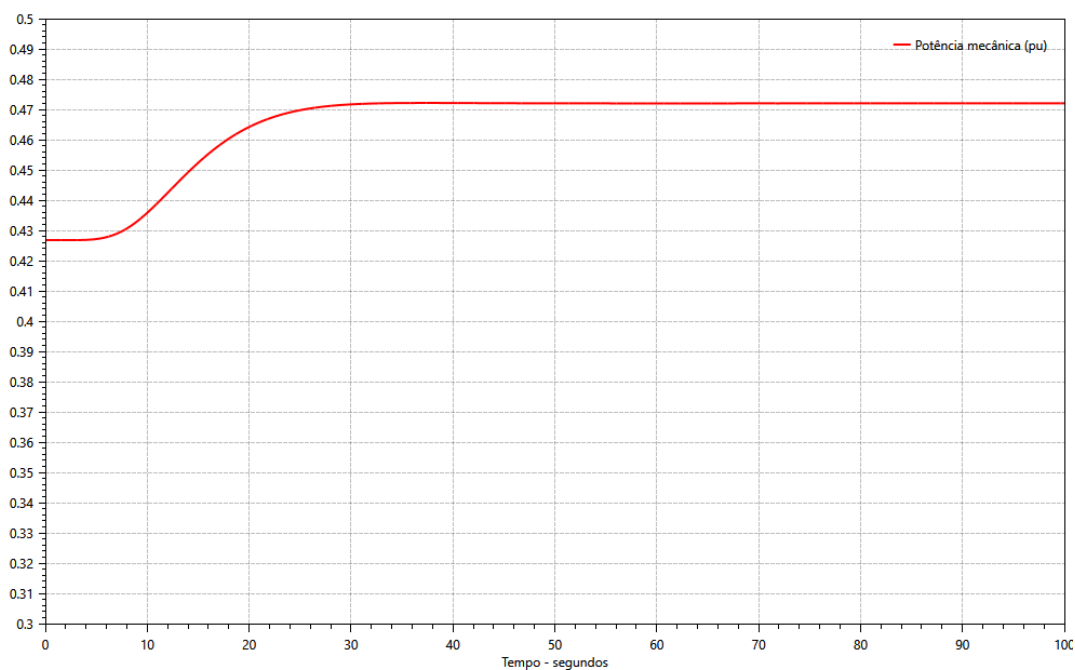


FIGURA 24 - POTÊNCIA MECÂNICA DE UM GERADOR - RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 20%.

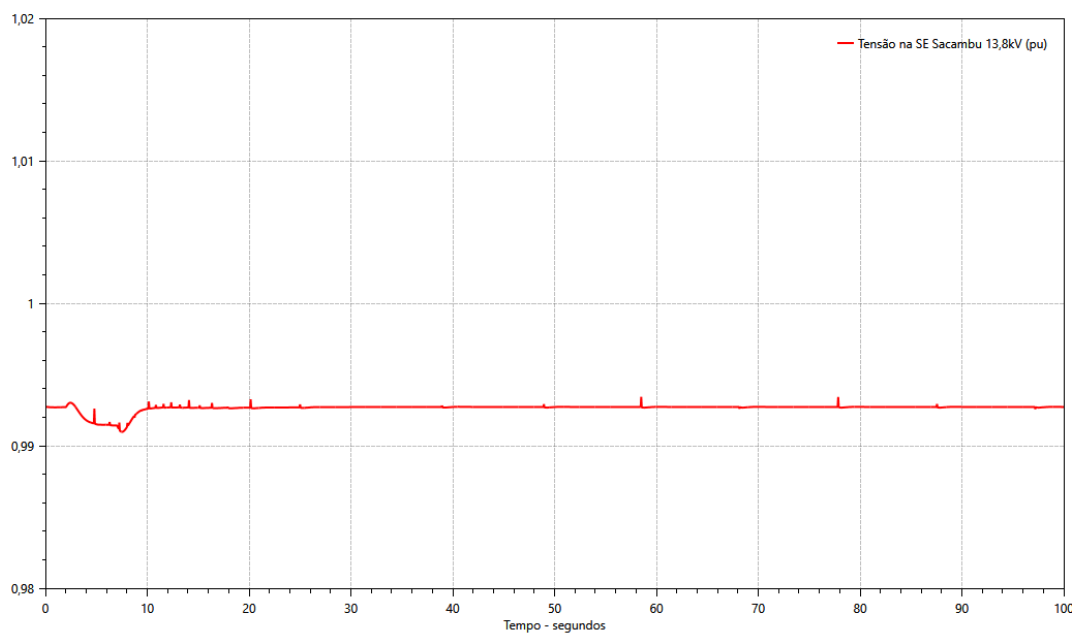


FIGURA 25 - VARIAÇÃO DA TENSÃO SACAMBU 13,8kV - RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 20%.

Destaca-se que se a redução se limitasse a 10% ou 20% as frequências mínimas seriam apenas 59,0Hz e 59,1Hz respectivamente. Pelos resultados acima, apresentados resumidos na **TABELA 4**, o nível de penetração que atenderia aos critérios de qualidade e segurança seria 20%.

TABELA 4 - CASOS DE SIMULAÇÃO COM 3 GERADORES, DESPACHADOS INICIALMENTE COM 41kW CADA.

Frequência mínima observada com 3 geradores (Hz)				
Caso	Geração Solar (% da pot. da carga)	Irradiação difusa (% da pot. despachada)		
		0	10	20
9	90	47,6	-	-
10	80	49	-	-
11	70	50,4	-	-
12	60	51,8	-	56,4
13	50	53,5	-	56,1
14	40	55	-	56,8
15	30	56,5	57,2	57,6
16	20	57,7	58,2	58,4

5.2.2.1 CASO 17

Geração solar igual a 84kW, 36% da carga, geração térmica com 2 geradores a diesel despachados 75kW cada um. Rampa decrescente de geração solar de 20%/s.

Neste caso, a frequência atinge um valor mínimo de 56,1Hz (FIGURA 26) com geração solar remanescente (difusa) igual a 20%; que atende ao critério de segurança.

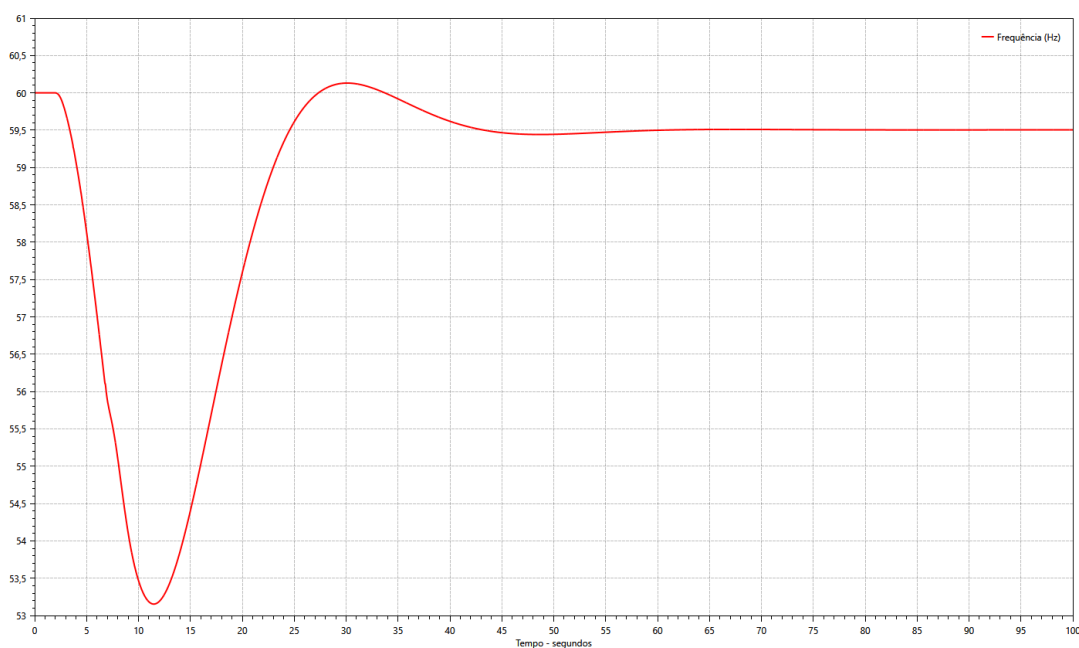


FIGURA 26 – VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

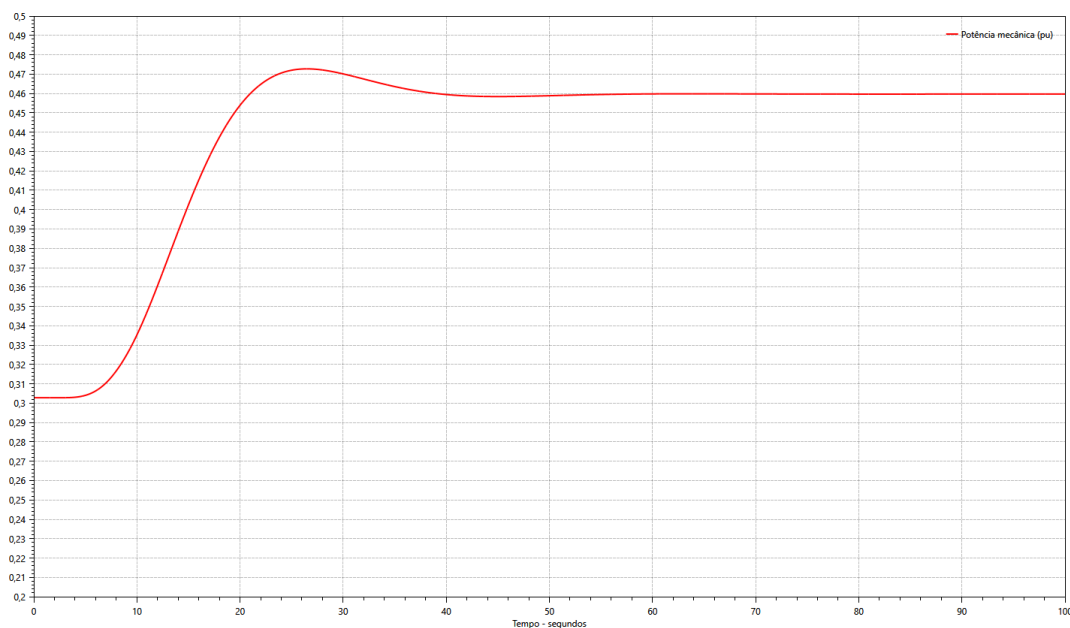


FIGURA 27 – POTÊNCIA MECÂNICA DE UM GERADOR— RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 36%.

Pelos resultados acima, apresentados resumidos na **TABELA 5**, considerando a geração remanescente/difusa superior a 10%, o nível de penetração que atenderia aos critérios de segurança e qualidade seria 10%.

TABELA 5 CASOS DE SIMULAÇÃO COM 2 GERADORES, DESPACHADOS INICIALMENTE COM 75kW

Frequência mínima observada com 2 geradores (Hz)				
Caso	Geração Solar (% da pot. da carga)	Irradiação difusa (% da pot. despachada)		
		0	10	20
17	36	53,2	-	56,1
18	30	54,5	-	56,7
19	20	56,7	57,5	57,8
20	15	57,5	58,2	58,4
21	10	58,3	58,8	58,9

A **TABELA 6** apresenta um resumo das análises com gerador diesel + fotovoltaico.

TABELA 6 RESUMO DOS RESULTADOS PARA AS SIMULAÇÃO DO GERADOR DIESEL+FOTOVOLTAICO

Condição	Nível Máximo de penetração de potência renovável sem ocorrência de eventos na frequência			Nível Máximo de penetração de potência renovável com ocorrências toleráveis de eventos na frequência		
	Irradiação difusa			Irradiação difusa		
	0%	10%	20%	0%	10%	20%

5 geradores a diesel operando sem limite mínimo de carga	-	10%	20%	20%	20%	36%
3 geradores a diesel trabalhando com limite mínimo de carga de 30%	-	-	-	30%	30%	60%
2 geradores a diesel trabalhando com limite mínimo de carga de 30%	-	10%	10%	20%	20%	36%

Consequentemente, observa-se que na ausência de um limite mínimo de operação para os geradores a diesel, uma condição pouco prática, é possível alcançar uma integração de até 30% de energia renovável sem ocorrência de eventos significativos relacionados à frequência. Ao estabelecer uma geração mínima para os geradores a diesel, identifica-se que não existe um intervalo livre de eventos de frequência; no entanto, com uma penetração de até 30% de energia renovável (acompanhada de 10% de potência difusa) ou 60% (com 20% de potência difusa), o sistema mantém-se operacional. A redução no número de geradores a diesel resulta em uma diminuição na capacidade de penetração de energia renovável para 20% (com 10% de potência difusa) ou 36% (com 20% de potência difusa), evidenciando a complexa interação entre a gestão da geração de energia e a estabilidade de um sistema de pequeno porte em cenários de alta penetração de fontes renováveis.

6. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS GERADOR DIESEL+FOTOVOLTAICO +ARMAZENAMENTO

Um inversor com bateria para armazenamento de energia é um dispositivo capaz de injetar potência ativa numa taxa de crescimento muito elevada, se contrapondo as reduções de potência decorrentes de variações da irradiância ou carga. Com o intuito de avaliar como seria possível elevar o nível de penetração de energia renovável solar, preservando-se os critérios de segurança e qualidade aqui mencionados, foi utilizado o modelo de inversor de bateria para uso estacionário, sensível a afundamentos de frequência com elevação transitória rápida de potência ativa. Não é escopo deste trabalho dimensionar o inversor adequado para o presente caso de Sacambu, porém apenas avaliar os possíveis impactos positivos que poderia se alcançar com a adoção deste recurso.

Cumprir destacar que a ação aqui analisada do inversor com bateria é simplesmente fornecer uma injeção transitória de potência ativa de modo a atenuar os afundamentos de frequência, dado que as unidades térmicas, mesmo tendo reserva girante, reage de forma lenta elevando a sua potência mecânica compensando a redução momentânea da potência elétrica solar.

6.1. FLUXOGRAMA

Os fluxogramas das análises estão dispostos na **FIGURA 28** e **FIGURA 29**

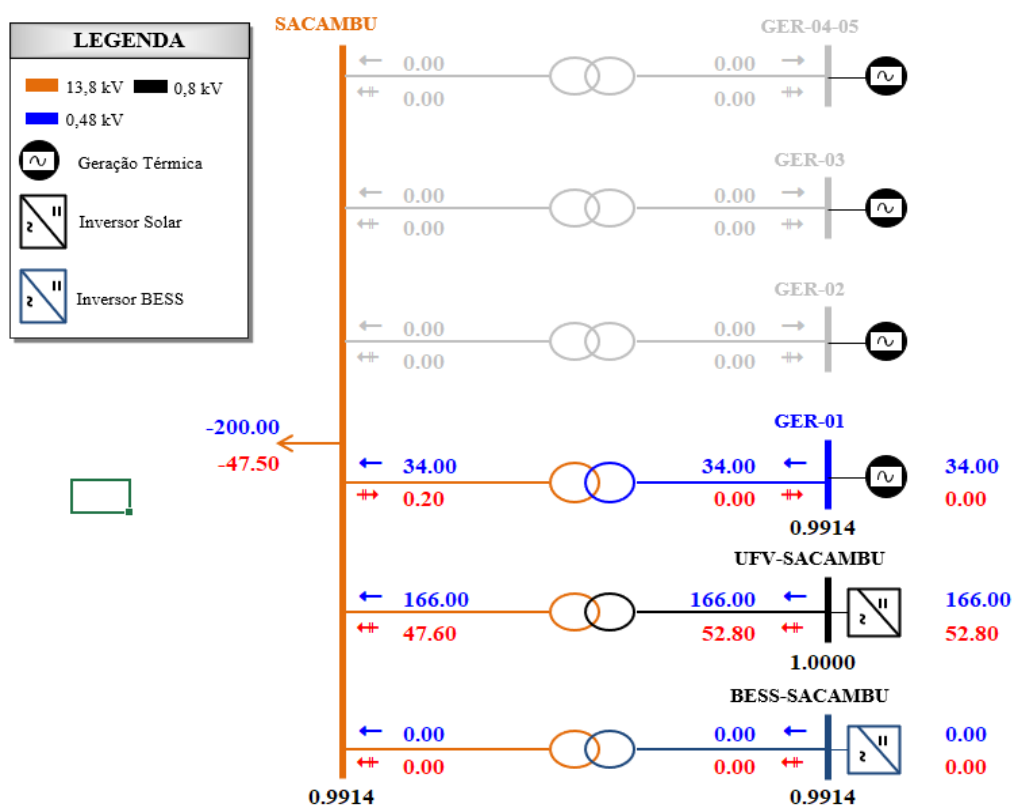


FIGURA 28 - CASO DE ELEVADA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO SOLAR - FLUXOGRAMA DA SE SACAMBU COM 1 GERADOR DESPACHADO COM 34kW, UFV ATENDENDO A 83% DA CARGA E A BATERIA COM 0kW.

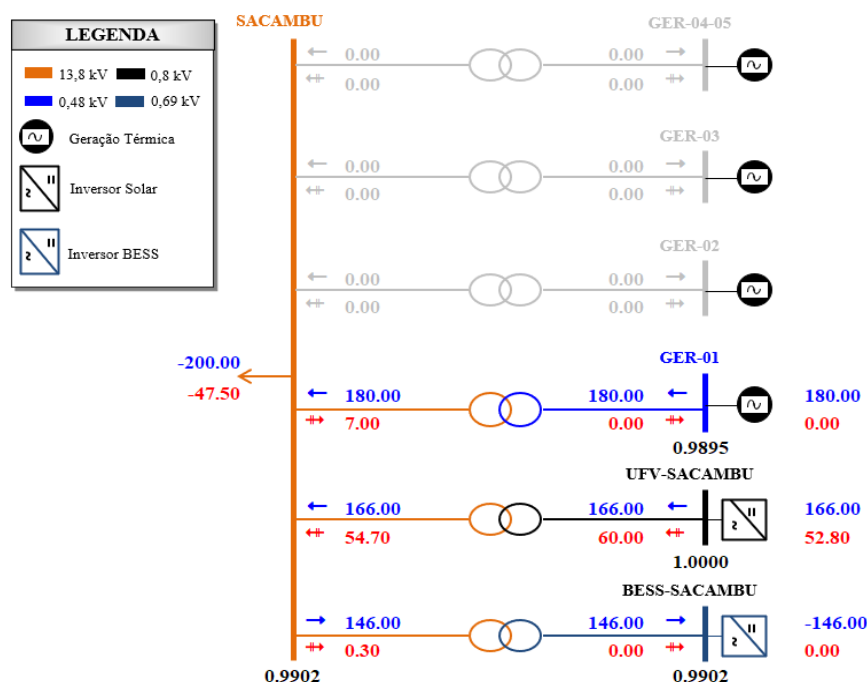


FIGURA 29 - CASO DE ELEVADA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO SOLAR - FLUXOGRAMA DA SE SACAMBU COM 1 GERADOR DESPACHADO COM 180kW, UFV ATENDENDO A 83% DA CARGA E A BATERIA CARREGANDO COM 146kW.

6.2. ANÁLISES

6.2.1 CASO 22

Geração solar igual a 166kW, 83% da carga, geração térmica com 1 gerador a diesel despachado 34kW, inversor/bateria com potência nominal de 1,0MVA. Rampa decrescente de geração solar de 20%/s.

Neste caso, a frequência atinge um valor mínimo de 58,98Hz (**FIGURA 30**), que atende aos critérios de segurança e qualidade. A **FIGURA 31** mostra que a resposta da unidade térmica a diesel é muito lenta e eleva apenas 3kW aproximadamente em 8s, sendo a variação de carga assumida majoritariamente pelo inversor/bateria (BESS).

A **FIGURA 32** mostra que o BESS responde com uma taxa aproximada de 27kW/s compensando de forma efetiva um decaimento simulado da potência fotovoltaica de 33kW/s.

Estes resultados demonstram que o BESS é capaz de compensar variações de potência fotovoltaica mesmo com taxas muito elevadas afetando muito pouco a unidade diesel.

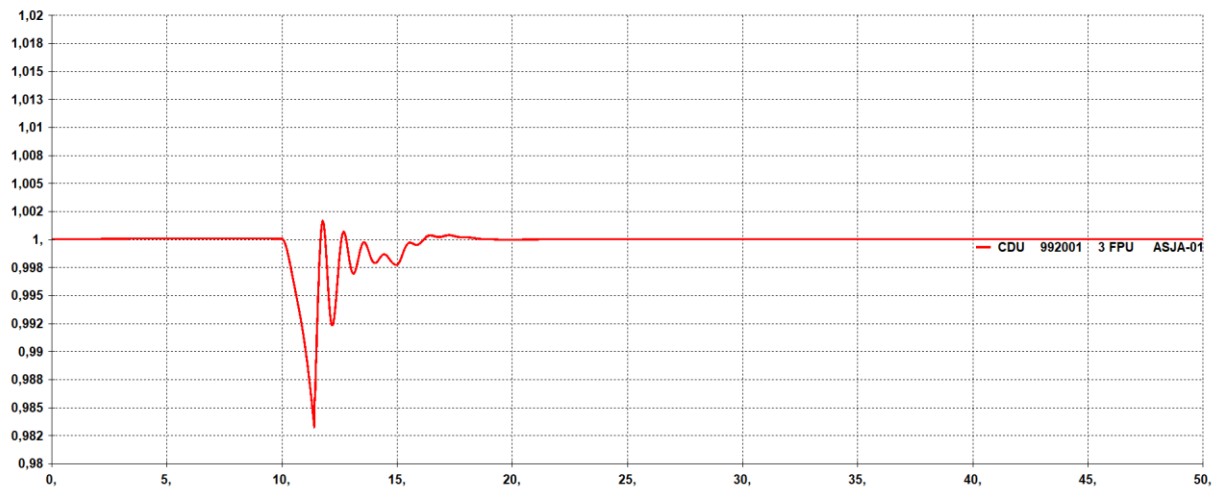


FIGURA 30 - VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA EM PU. -- RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 36%.

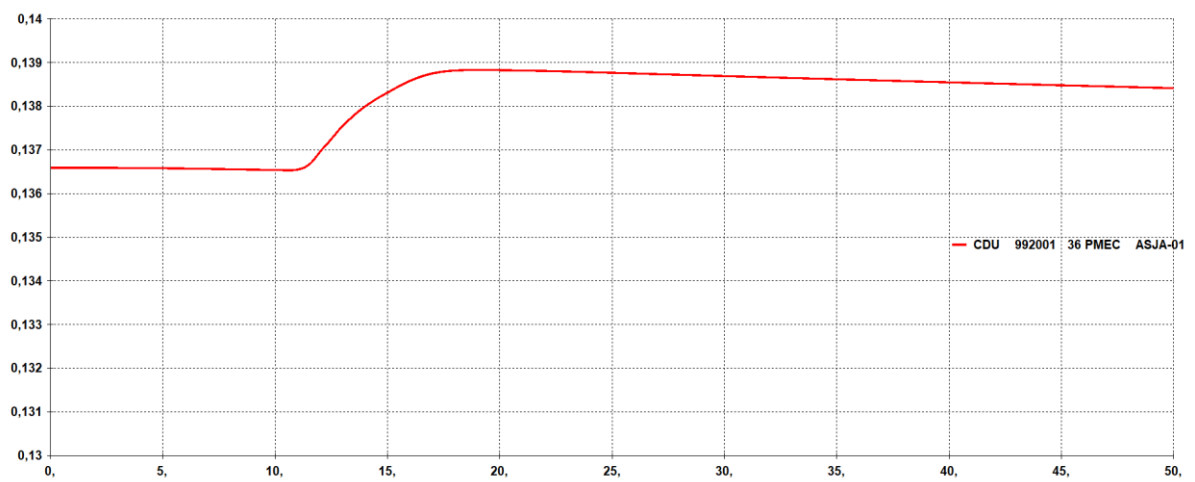


FIGURA 31 - POTÊNCIA MECÂNICA DE UM GERADOR -- RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 36%.

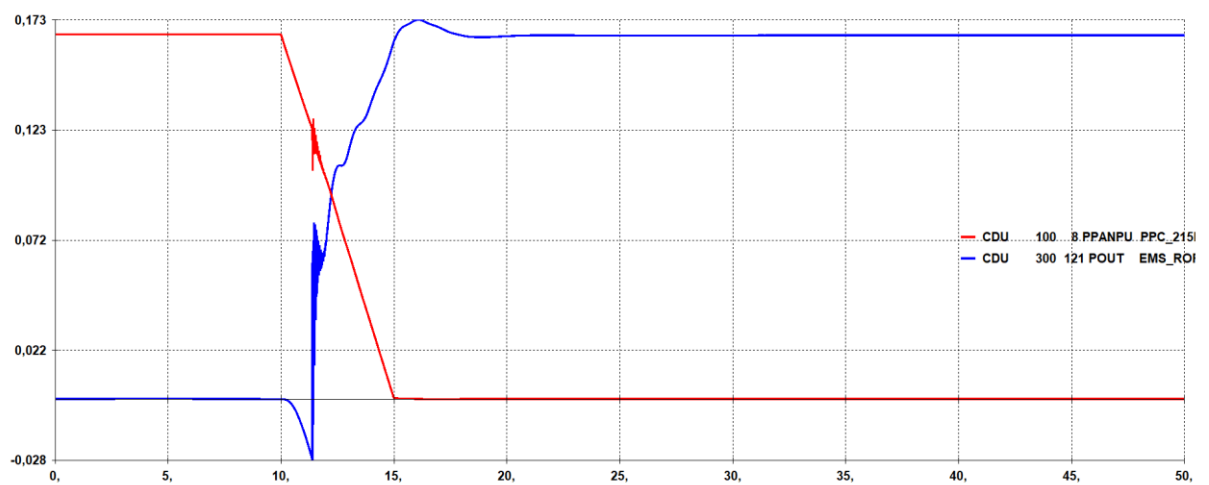


FIGURA 32 - POTÊNCIA DO INVERSOR/BATERIA -- RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 36%.

6.2.2 CASO 23

Geração solar igual a 166kW, 83% da carga, geração térmica com 1 gerador a diesel despachado 180kW, inversor/bateria com potência nominal de 1,0MVA, despachada com - 146kW (em carregamento). Rampa decrescente de geração solar de 20%/s.

Neste caso, a frequência atinge um valor mínimo de 59,88Hz (**FIGURA 33**), que atende aos critérios de segurança e qualidade. A **FIGURA 34** mostra que a resposta da unidade térmica a diesel é muito lenta e praticamente não aumenta a potência mecânica por ação do regulador de velocidade em 8s.

A **FIGURA 35** mostra que o BESS responde com uma taxa aproximada de 27kW/s compensando de forma efetiva um decaimento simulado da potência fotovoltaica de 33kW/s. A bateria assume praticamente a geração solar total (166kW) que foi reduzida a zero em 5s. Estes resultados demonstram que o BESS é capaz de compensar com elevada eficiência e rapidez as variações de potência fotovoltaica mesmo considerando taxas de 20%/s aqui considerada.

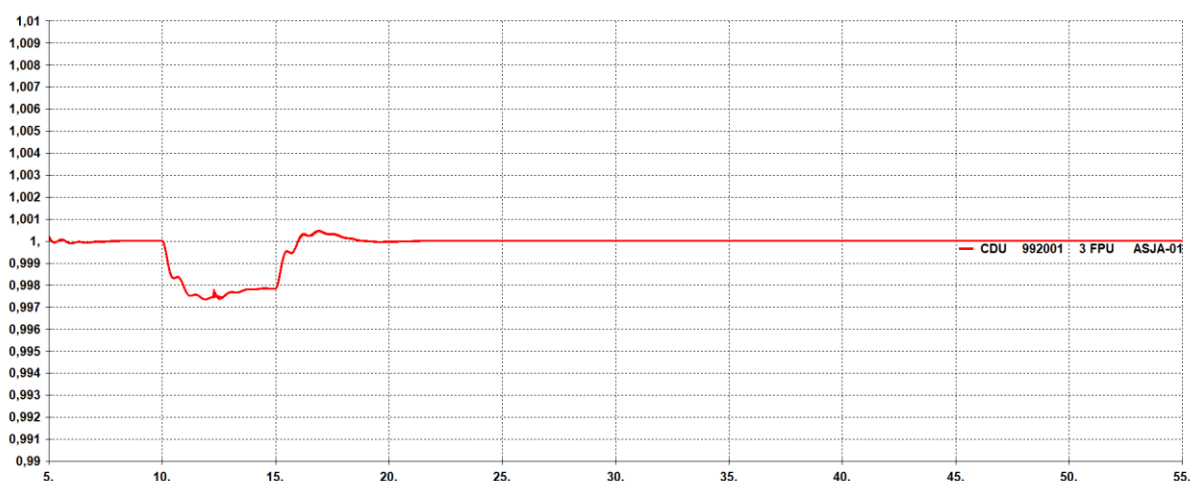


FIGURA 33 - CASO 23 – RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 36% - VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA EM PU.

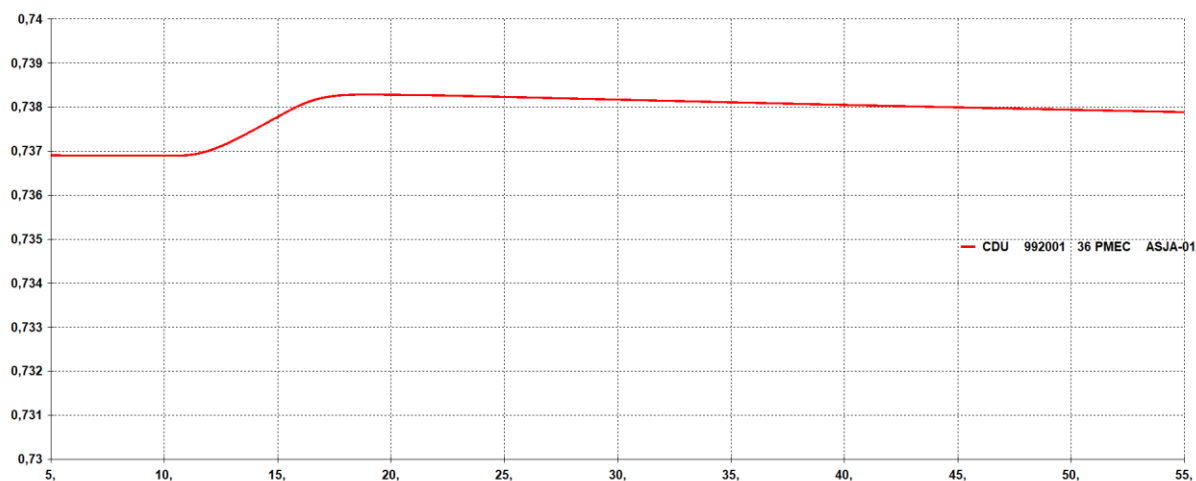


FIGURA 34 - CASO 23 – RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 36% - POTÊNCIA MECÂNICA DE UM GERADOR EM PU.

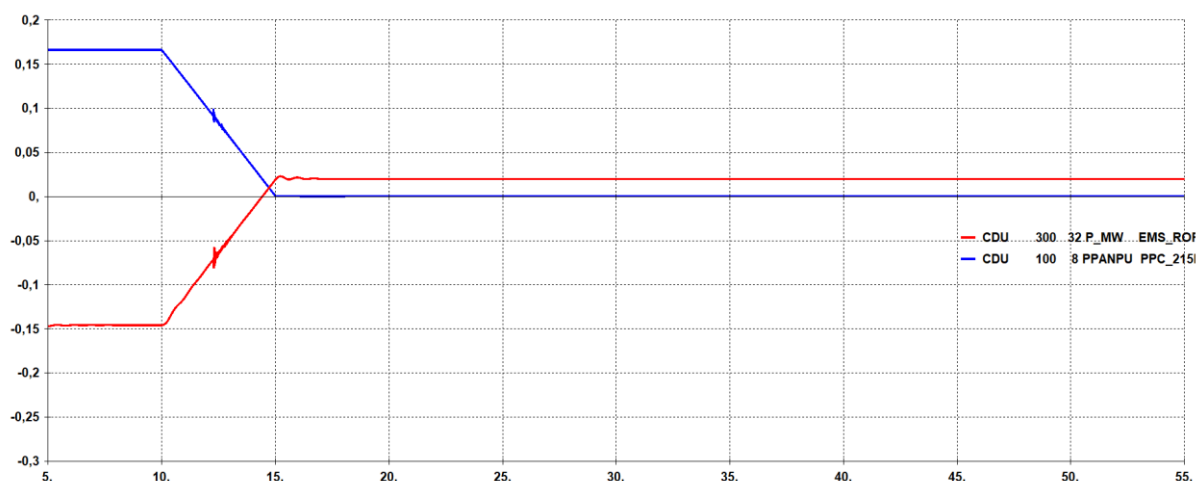


FIGURA 35 - CASO 23 – RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO SOLAR COM GERAÇÃO INICIAL DE 36% - POTÊNCIA DO INVERSOR/BATERIA (VERMELHO) E DA UFV (AZUL).

6.2.3 CASO 24

Geração solar igual a 180kW, 90% da carga, geração térmica com 1 gerador a diesel despachado 180kW, inversor/bateria com potência nominal de 1,0MVA, despachada com - 160kW (em carregamento). Rampa decrescente de geração solar de 20%/s.

Neste caso, a frequência atinge um valor mínimo de 59,82Hz (FIGURA 36), que atende aos critérios de segurança e qualidade. A FIGURA 37 mostra que a resposta da unidade térmica a diesel é muito lenta e praticamente não aumenta a potência mecânica por ação do regulador de velocidade. Também neste caso, verifica-se que a geração do gerador a diesel é

praticamente nula, aproximadamente 1,5 (máxima variação) kW com um despacho de 737kW, o que significa 0,2%.

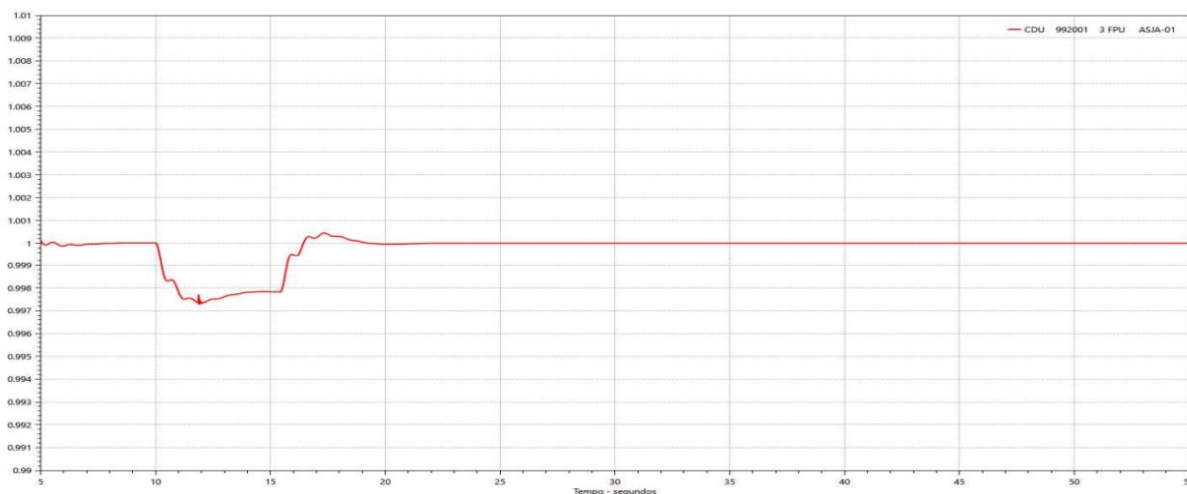


FIGURA 36 – RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA COM GERAÇÃO INICIAL DE 90% DA CARGA – VARIAÇÃO DE FREQUENCIA “pu”

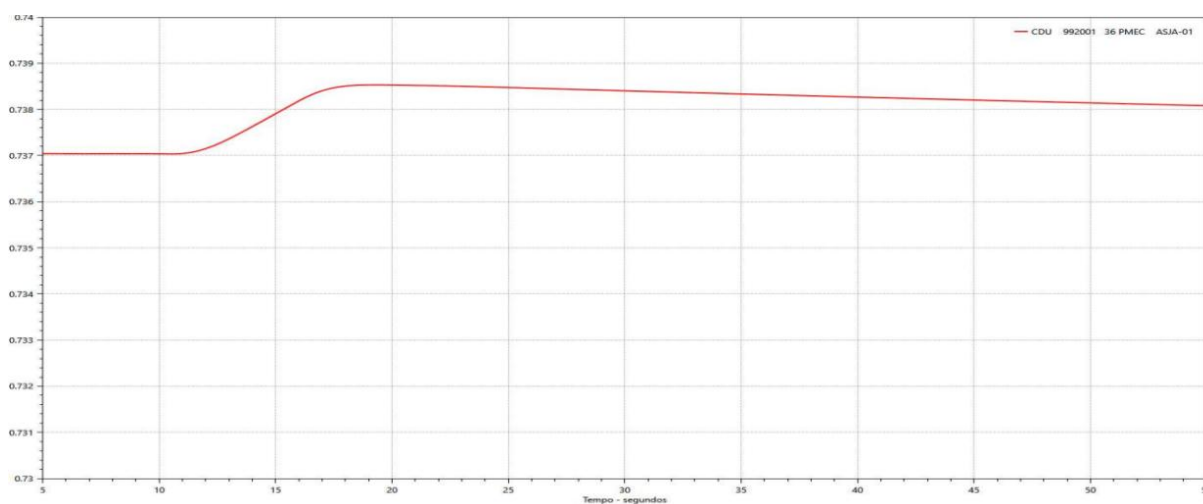


FIGURA 37 – RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA COM GERAÇÃO INICIAL DE 90% DA CARGA – POTÊNCIA MECÂNICA DO GERADOR

A FIGURA 38 mostra que o BESS responde com uma taxa aproximada de 33kW/s compensando de forma efetiva um decaimento simulado da potência fotovoltaica de 36kW/s.

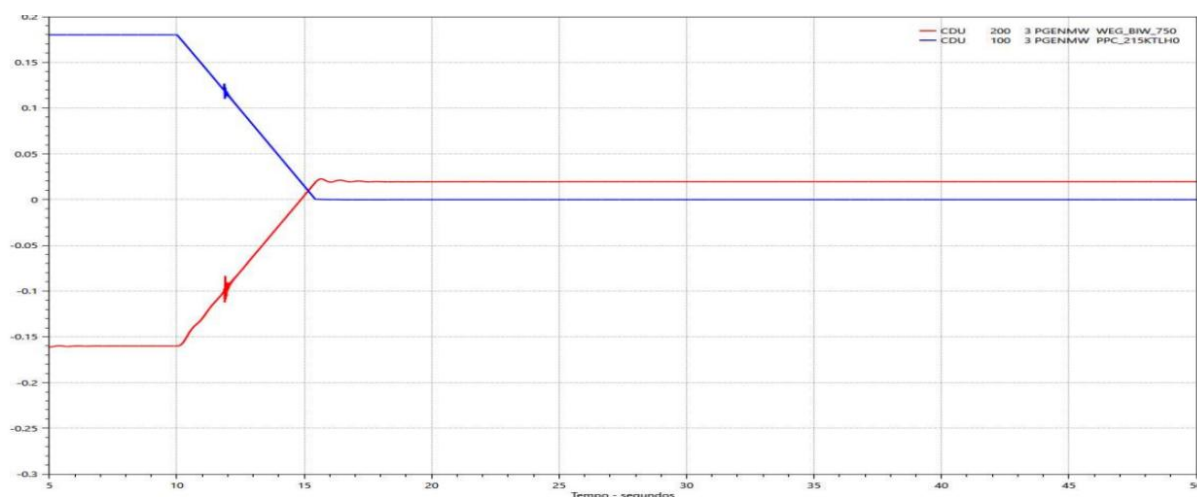


FIGURA 38 – RAMPA DECRESCENTE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA COM GERAÇÃO INICIAL DE 90% DA CARGA – POTÊNCIA DO INVERSOR/BATERIA (VERMELHO) E DA UFV (AZUL).

A bateria assume praticamente a geração solar total (180kW) que foi reduzida a zero em 5s. Estes resultados demonstram que o BESS é capaz de compensar com elevada eficiência e rapidez as variações de potência fotovoltaica mesmo considerando taxas de 20%/s aqui considerada.

7. CONCLUSÃO

Os estudos em questão basearam-se nos dados e modelos do sistema isolado de Sacambu presentemente acessíveis, assim como em informações típicas de outras instalações análogas. Apesar do estudo de caso ter focado nesta comunidade, os resultados aqui observados podem ser generalizados para outras comunidades do SISOL, devido à elevada similaridade entre os sistemas. Para os geradores a diesel, foram empregados modelos de controle de tensão e velocidade oriundos do repositório de modelos do Operador Nacional do Sistema (ONS) específicos para geradores a diesel térmicos acionados por motor diesel. A taxa máxima de variação da irradiância, definida em 20%/pu, que por sua vez baseia-se em medições reais de campo [1] para aplicação em estudos pertinentes. Nos cenários que incorporaram Sistema de Armazenamento de Energia por Bateria (BESS), utilizou-se um modelo específico, representando um inversor real no ambiente do ANATEM.

A análise dos resultados possibilita uma avaliação dos impactos sob quaisquer critérios preestabelecidos. **Seguindo os critérios deste estudo, identificou-se que o nível máximo de penetração de energia solar sem o uso de BESS é de 20% da carga máxima, em conformidade**

com o critério de segurança, e de 10% segundo o critério de qualidade. Esses valores foram alcançados com duas unidades de geração térmica, respeitando-se o despacho mínimo de cada gerador a diesel em 30% de sua capacidade nominal.

Adicionalmente, a introdução de um BESS permitiu que a simulação demonstrasse que uma geração solar correspondente a 90% da carga total não compromete significativamente a estabilidade da geração síncrona a diesel, mesmo sob a condição desfavorável de operação com uma única unidade diesel.

A partir dos itens discutidos, infere-se que a integração de geração solar em conjunto com unidades de geração síncrona a diesel pode atingir níveis elevados de até 90%, com a instalação de BESS que respondam adequadamente a variações de frequência e que estejam corretamente dimensionados.

Para uma apreciação precisa do nível máximo de penetração de energia solar em casos específicos, bem como para o dimensionamento adequado dos inversores e baterias solares, são necessários estudos específicos que empreguem modelos e dados concretos.

Estudos aprofundados deverão apontar a importância da implementação de um sistema de controle em tempo real, que possa monitorar e coordenar os despachos das unidades diesel e a geração solar. Tal medida visa a maximização contínua da geração solar, assegurando simultaneamente os padrões de qualidade e segurança para o sistema elétrico isolado em sua totalidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *“The need of synchronous inertia in autonomous power systems with increasing shares of renewables”*, Pedro Beires, C. Moreira, João P. Lopes, Agostinho Figueira, INESC TEC, Porto, Portugal.
- [2] *Extreme Solar Overirradiance events: Occurrence and Impacts on Utility scale photovoltaic power plants in Brazil*, Lucas R. do Nascimento, Trajano Viana, Rafael Campos e Ricardo Ruther. May, 16, 2019, International Solar Energy Society.
- [3] *Procedimentos de Rede*, ONS, disponível em <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>, acesso em 01/03/2024
- [4] *Power quality degradation caused by congested transmission system and dynamic loads*, Alvaro J. P. Ramos, Daniel P. Lira. Symposium on Power Quality, Boston, USA, 2000.

Transição Energética em Sistemas Isolados (TE Sisol)

Estudos de Estabilidade Elétrica e Desempenho – Produto 10



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

