

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

RENATA FARACO CUNHA

**OPERAÇÃO DE AMBIENTES DE MISSÃO CRÍTICA COMO
SUPORTE À SMART GRID: ESTUDO E SIMULAÇÃO**

FLORIANÓPOLIS, 2020.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

RENATA FARACO CUNHA

**OPERAÇÃO DE AMBIENTES DE MISSÃO CRÍTICA COMO
SUPORTE À SMART GRID: ESTUDO E SIMULAÇÃO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador:

Jackson Lago, Dr. Eng

Coorientador: Márcio Ortmann, Dr. Eng

FLORIANÓPOLIS, 2020.

Cunha, Renata Faraco

Operação de Ambientes de Missão Crítica como Suporte à Smart Grid: Estudo e Simulação / Renata Faraco Cunha; Orientador: Jackson Lago, Dr. Eng– Florianópolis, SC, 2020.

179 p. : il color.

Dissertação de Mestrado (Eng. Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.
Inclui referências.

1. Data Center. 2. Smart Grid. 3. Serviço ancilar. I. Lago, Jackson II. Ortmann, Marcio S. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. IV. Operação de Ambientes de Missão Crítica como Suporte à Smart Grid: Estudo e Simulação .

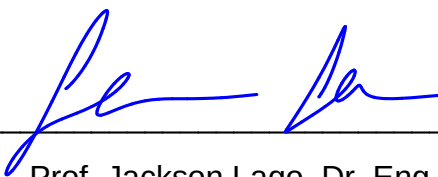
OPERAÇÃO DE AMBIENTES DE MISSÃO CRÍTICA COMO SUPORTE À SMART GRID: ESTUDO E SIMULAÇÃO

RENATA FARACO CUNHA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 10 de junho de 2020.

Banca Examinadora:



Prof. Jackson Lago, Dr. Eng.
(Orientador)



Prof. Márcio Silveira Ortmann, Dr. Eng.
(Coorientador)



Prof. Mauro Faccioni Filho, Dr. Eng.
(UNISUL)



Prof. Daniel Tenfen, Dr. Eng.
(IFSC)



Cesare Quinteiro Pica, Dr Eng.
(CERTI)

*Este trabalho é dedicado
ao Eng. Ulysses Cunha Neto, meu pai.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido, companheiro e melhor amigo, Flavio, por todo o apoio nestes dois anos de dedicação. Sem ele, este trabalho não teria sido conquistado. Ao meu pai, pelo exemplo e por ter fomentado em mim a vontade de sempre aprender mais sobre como o mundo funciona. Aos meus orientadores Jackson e Márcio, por toda a orientação e calma transmitida quando eu achava que não iria conseguir. À minha mãe, Maria de Lourdes, e minha tia, Anita, pela compreensão da ausência nos finais de semana de estudos. A tia Stela, pelo exemplo e por todo o suporte nas horas que eu mais precisei. Aos meus colegas sobreviventes Pierry, Marcos, Luís e Dyego, pela amizade, todos os aprendizados, descontração quando possível e principalmente *benchmarking*. Ao professor Morini pela contribuição na parte de modelagem do sistema de refrigeração. Aos meus mentores Moacyr e Mauro pela coragem de contratar uma engenheira recém formada para trabalhar com *data centers*, Leônidas por ter confiado na minha dedicação, Deni e Hemerson, pela generosidade de terem me passado tanto conhecimento. A meu time de trabalho, Gabriel, Tiago, Luis, Eduardo, Rafael, Robson, Thiago, Guilherme, Nayana e todos por me aguentarem todos os dias, terem paciência comigo e serem uma equipe de trabalho maravilhosa, que faz com que trabalhar seja também a minha diversão. Ao pessoal da van, por terem tirado a minha concentração durante o trajeto até a empresa, quando eu precisava ler artigos para este trabalho. A todos que de alguma forma me ajudaram nessa etapa, são tantas pessoas que eu tive a sorte de conviver e aprender.

*"The good thing about science is that
it's true whether or not
you believe in it."
Neil deGrasse Tyson*

RESUMO

Ambientes de missão crítica especializados criados para comportar sistemas cibernéticos – os *data centers* – vêm crescendo em grande proporção à medida que a sociedade se torna cada vez mais dependente de recursos virtuais. Estes ambientes, que têm como sua principal métrica de avaliação a disponibilidade, possuem infraestruturas complexas de suporte para manterem-se em operação continuamente. Por outro lado, a evolução da tecnologia também traz novas maneiras de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, de forma renovável e em conformidade com o meio ambiente. Para comportar estas novas possibilidades da rede elétrica, o conceito de rede inteligente (*smart grid*) vem se desenvolvendo para prover, dentre outras melhorias, resiliência à rede. Este trabalho realiza um estudo da operação de *data centers* no contexto de *smart grids* e avalia os impactos deste tipo de carga na rede elétrica quando operados de forma inteligente. Para isso, as possibilidades de auxílio de ambientes de missão crítica foram identificadas e analisadas para apresentar formas com que cargas especiais, como os *data center*, podem prover suporte à rede inteligente com o objetivo de auxiliar o equilíbrio entre geração e consumo de energia elétrica. Para atingir alto nível de disponibilidade, *data centers* utilizam recursos como equipamentos redundantes, UPS, geradores reserva e sistema de refrigeração. Avalia-se então as possibilidades para que esta infraestrutura também beneficie a rede elétrica como um todo. Assim sendo, este trabalho verifica formas com que o *data center* poderá auxiliar a resiliência da rede e utiliza o método de simulação matemática para validar estas possibilidades. Através deste estudo, foi possível identificar e examinar diferentes cenários em que o *data center* irá favorecer a rede elétrica. Deste modo, sendo esta estratégia adotada por várias cargas especiais em conjunto, a rede elétrica terá novas formas de manter sua resiliência e explorar diferentes estratégias econômicas para este tipo de consumidor, beneficiando também os *data centers*, com um suprimento de energia estável pelo sistema elétrico.

Palavras-chave: Data Center. Missão crítica. Smart Grid. Serviço Ancilar. Suporte à rede elétrica.

ABSTRACT

Specialized mission-critical environments designed to support cyber systems, known as data centers, are growing in large proportion as the society becomes increasingly dependent on virtual resources. These environments have their availability as main metric of evaluation and complex support infrastructures to remain in continuous operation. On the other hand, the evolution of technology also brings new ways of generating, transmitting and distributing electricity, renewable and in accordance with the environment. To assimilate these new possibilities of the electric grid, the concept of smart grid has been developed to provide resilience to the network, among others features. This work perform a study of the operation of data centers in the context of smart grids and evaluates the impacts of this type of load on the power grid when operated intelligently. For this, the support possibilities in mission-critical environments have been identified and analyzed to present ways of special loads, as data centers, to provide support to the smart grid in order to assist on the balance between generation and consumption of electric energy. To achieve a high level of availability, data centers use redundant equipment, UPS, backup generators and cooling systems. The possibilities for this infrastructure to also benefit the electricity grid as a whole are assessed. Therefore, this work verifies which forms with the data center can support network resilience and uses a mathematical method to validate these possibilities. Through this study, it was possible to identify and examine different scenarios in which the data center will favor the power grid. So, when this strategy is adopted by several special loads together, the power grid will have new ways to maintain its resilience, also benefiting data centers with stable energy supply by the electrical system.

Keywords: Data Center. Smart Grid. Mission-critical Environment. Ancillary Service. Mains support.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ambientes de um <i>data center</i>	27
Figura 2 – Classificação Tier de <i>data center</i>	27
Figura 3 – Diagrama de blocos típico de funcionamento do UPS.	30
Figura 4 – Diagrama de blocos de funcionamento de uma fonte redundante.	33
Figura 5 – Configuração da refrigeração em <i>data centers</i>	34
Figura 6 – Esquemático da arquitetura de um <i>data center</i> tier I.	35
Figura 7 – Esquemático da arquitetura de um <i>data center</i> tier II.	37
Figura 8 – Esquemático da arquitetura de um <i>data center</i> tier III.	38
Figura 9 – Esquemático da arquitetura de um <i>data center</i> tier IV.	39
Figura 10 – Arquitetura típica de uma rede de energia elétrica tradicional.	43
Figura 11 – Esquemático da arquitetura da <i>smart grid</i>	44
Figura 12 – Participação por tipo de fonte na matriz elétrica brasileira.	50
Figura 13 – Participação de cada fonte na geração distribuída em 2017.	51
Figura 14 – Consumo de energia por diferentes subsistemas de um <i>data center</i>	58
Figura 15 – Processo de administração dos serviços ancilares.	67
Figura 16 – Comparativo entre tarifa branca e tarifa convencional.	71
Figura 17 – Esquemático de funcionamento de uma chave de transferência automática.	76
Figura 18 – Esquemático do fluxo de energia e informação no <i>data center</i>	81
Figura 19 – Modelo da carga de TI de um <i>data center</i> em Matlab ®.	84
Figura 20 – Modelo da dinâmica lenta da carga de TI do <i>data center</i> em Matlab ®.	84
Figura 21 – Modelo da dinâmica rápida da carga de TI do <i>data center</i> em Matlab ®.	85
Figura 22 – Modelo do perfil de carga de TI do <i>data center</i> a ser analisado no estudo de caso em Matlab ®.	86
Figura 23 – Modelo do controle de temperatura pelo sistema de refrigeração de um <i>data center</i>	88
Figura 24 – Modelo do consumo de energia pelo sistema de refrigeração de um <i>data center</i> em Matlab ®.	90
Figura 25 – Resposta a um degrau da referência (temperatura) de 18 °C a 19 °C e 18 °C a 17 °C pelo modelo de refrigeração em Matlab ®.	91
Figura 26 – Dinâmica de perturbação no modelo de refrigeração em Matlab ®.	92
Figura 27 – Curva de eficiência de um UPS em relação ao seu fator de carga.	93
Figura 28 – Curva de eficiência de um UPS em relação ao seu fator de carga.	94
Figura 29 – Modelo para estimativa das perdas no UPS.	94
Figura 30 – Gráfico das perdas do UPS devido a uma potência de entrada da carga de TI.	95

Figura 31 – Modelo do carregamento/descarregamento e estado de carga de uma bateria em Matlab ®.	97
Figura 32 – Simulação do modelo do UPS: perfil de carga imposta ao sistema de UPS.	98
Figura 33 – Simulação do modelo do UPS: estado da bateria do UPS quando imposto carga.	98
Figura 34 – Simulação do modelo do UPS: perfil de carga percebido pela rede elétrica durante o descarregamento e carregamento do UPS.	99
Figura 35 – Modelo do grupo de geradores em Matlab ®.	101
Figura 36 – Simulação do modelo do grupo moto gerador quando aplicado um perfil de carga e um comando de partida.	101
Figura 37 – Simulação do modelo do grupo moto gerador apresentada da perspectiva da rede elétrica.	102
Figura 38 – Modelo geral do <i>data center</i> e suas conexões.	103
Figura 39 – Simulação geral do <i>data center</i> : subsistemas de carga de TI e UPS. Funcionamento em um cenário de queda de energia e restabelecimento.	104
Figura 40 – Simulação geral do <i>data center</i> : subsistemas de refrigeração e geradores. Funcionamento em um cenário de queda de energia e restabelecimento.	105
Figura 41 – Representação do fluxo de energia para o cenário de corte de carga de TI.	110
Figura 42 – Perfil de demanda do <i>data center</i> visto do ponto de vista da rede elétrica nas simulações com e sem corte de carga de TI.	111
Figura 43 – Estado de carga da bateria durante o corte de carga de TI.	111
Figura 44 – Perfil de potência do UPS durante o corte de carga de TI nos períodos de fornecimento e consumo de energia.	112
Figura 45 – Relação da potência demanda da rede elétrica entre cenários com e sem corte da carga crítica.	113
Figura 46 – Representação do fluxo de energia para o cenário corte de carga de refrigeração.	114
Figura 47 – Perfil de demanda do <i>data center</i> do ponto de vista da rede elétrica nas simulações com e sem corte de carga de refrigeração.	115
Figura 48 – Evolução da temperatura durante o corte de carga de refrigeração.	116
Figura 49 – Potência demandada pela refrigeração durante o cenário de corte de carga.	116
Figura 50 – Relação entre potência demandada da rede elétrica nos cenários com e sem corte de carga crítica.	117

Figura 51 – Representação do fluxo de energia para o cenário de modulação de carga pelo UPS.	118
Figura 52 – Modelo do UPS em operação para auxílio à modulação de carga. .	119
Figura 53 – Modelo cálculo do erro entre referência e rede elétrica para a modulação de carga.	120
Figura 54 – Potência demandada da rede elétrica nos cenários com e sem modulação de corrente para mesma dinâmica de carga de TI. . . .	120
Figura 55 – Diferença entre potência do <i>data center</i> e referência.	121
Figura 56 – Estado de carga da bateria durante simulação de modulação de carga.	121
Figura 57 – Potência instantânea fornecida pela bateria durante simulação de modulação de carga.	122
Figura 58 – Potência demandada da rede elétrica nos cenários com e sem modulação de corrente, com a mesma dinâmica da carga de TI e retorno ao estado inicial da carga da bateria.	123
Figura 59 – Estado de carga da bateria durante simulação do cenário de modulação de carga por tempo determinado e retorno ao estado inicial de carga.	124
Figura 60 – Erro acumulado entre referência a potência da rede elétrica com modulação da potência via UPS por tempo determinado.	124
Figura 61 – Representação do fluxo de energia para o cenário modulação de carga pela refrigeração.	125
Figura 62 – Modelo de refrigeração para modulação de carga.	126
Figura 63 – Demanda de carga vista da rede elétrica com e sem modulação de carga pela refrigeração.	127
Figura 64 – Erro acumulado entre referência e demanda do <i>data center</i>	127
Figura 65 – Dinâmica da temperatura com modulação de carga pela refrigeração.	128
Figura 66 – Perfil de potência do sistema de refrigeração com e sem modulação de carga.	128
Figura 67 – Demanda de carga imposta a rede elétrica com e sem modulação de carga pelo sistema de refrigeração e potência aplicada ao sistema de refrigeração.	129
Figura 68 – Erro acumulado entre referência e demanda do <i>data center</i>	130
Figura 69 – Dinâmica da temperatura com modulação de carga pelo sistema de refrigeração por período determinado e retorno ao estado inicial. . .	130
Figura 70 – Representação do fluxo de energia para o cenário de fornecimento de energia através do UPS.	132
Figura 71 – Perfil de demanda do <i>data center</i> da perspectiva da rede elétrica nas simulações com e sem fornecimento de energia pelo UPS.	133

Figura 72 – Estado de carga das baterias durante o fornecimento de energia pelo UPS.	133
Figura 73 – Perfil de potência do UPS durante o fornecimento de energia.	134
Figura 74 – Relação entre potência demanda da rede elétrica nos cenários com e sem fornecimento de energia pelo UPS.	135
Figura 75 – Representação do fluxo de energia para o cenário de fornecimento de energia através do grupo moto gerador.	136
Figura 76 – Perfil de demanda do <i>data center</i> da perspectiva da rede elétrica nas simulações com e sem fornecimento de energia pelo grupo moto gerador.	137
Figura 77 – Perfil da potência do grupo moto gerador durante o fornecimento de energia.	137
Figura 78 – Relação entre potência demandada da rede elétrica nos cenários com e sem fornecimento de energia pelo grupo moto gerador.	138
Figura 79 – Diagrama de grandezas e funcionalidades da plataforma DataFaz.	142
Figura 80 – Painel de monitoramento da carga de TI que será inserido na plataforma DCIM.	144
Figura 81 – Painel de monitoramento e controle de refrigeração que será inserido na plataforma DCIM.	146
Figura 82 – Painel de monitoramento e controle de UPS que será inserido na plataforma DCIM.	148
Figura 83 – Painel de monitoramento e controle do grupo moto gerador que será inserido na plataforma DCIM.	150
Figura 84 – Painel de monitoramento e controle do <i>data center</i> que será inserido na plataforma DCIM.	151
Figura 85 – Efeito fotovoltaico e efeito fotoelétrico.	167
Figura 86 – Relação característica entre tensão e corrente de células fotovoltaicas.	168
Figura 87 – Residência com produção de energia solar.	169
Figura 88 – Evolução da geração e potência instalada de usinas solares no SIN.	170
Figura 89 – Fator de capacidade médio (%) por usina solar - subsistema sudeste/centro-oeste (abril de 2019).	170
Figura 90 – Aerogerador em detalhes.	172
Figura 91 – Esquemático de modelos de aerogeradores síncronos e assíncronos.	173
Figura 92 – Evolução da geração de energia eólica - SIN.	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Avaliação do valor do PUE e DCIE	40
Tabela 2 – Comparação entre rede tradicional e <i>smart grid</i>	44
Tabela 3 – <i>Data center</i> como suporte à <i>smart grid</i>	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASG	<i>Asynchronous Generator</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
CA	Corrente Alternada
CAG	Controle Automático de Geração
CC	Corrente Contínua
CCP	<i>Critical Peak Pricing</i>
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CPSA	Contratos de Prestação de Serviços Ancilares
DCIE	<i>Data Center Infrastructure Efficiency</i>
DCIM	<i>Data Center Infrastructure Management</i>
ENIAC	<i>Electronic Numerical Integrator and Computer</i>
GB	<i>Gearbox</i>
GS	Gerador Síncrono
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PTR	<i>Peak Time Rebate</i>
PUE	<i>Power Usage Effectiveness</i>
RTP	<i>Real Time Pricing</i>
SEP	Sistema Especial de Proteção
SG	<i>Synchronous Generator</i>

SIN	Sistema Interligado Nacional
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
TI	Tecnologia da Informação
TOU	<i>Time-of-use</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
UUUG	<i>Uninterruptible Uptime Users Group</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativa	21
1.2	Definição do problema	22
1.3	Objetivo geral	23
1.4	Objetivos específicos	23
2	DATA CENTERS: CONCEITO E ARQUITETURAS	25
2.1	Histórico e contextualização de <i>data centers</i>	25
2.2	Classificação	26
2.2.1	Tier I: Básico	28
2.2.2	Tier II: Componentes redundantes	28
2.2.3	Tier III: Sustentação Simultânea	28
2.2.4	Tier IV: Tolerante a falhas	28
2.3	Estruturas de suporte à disponibilidade	29
2.3.1	UPS e baterias	29
2.3.2	Grupo Motogerador	31
2.3.3	Fontes de alimentação redundantes para equipamentos críticos	32
2.3.4	Refrigeração	33
2.4	Arquiteturas x Disponibilidade	34
2.4.1	Arquitetura Tier I	34
2.4.2	Arquitetura Tier II	35
2.4.3	Arquitetura Tier III	37
2.4.4	Arquitetura Tier IV	38
2.5	Métricas de Eficiência Energética	39
2.6	Comentários	41
3	SMART GRIDS: FUNDAMENTOS E DESAFIOS DA REDE INTELIGENTE	42
3.1	Conceito	42
3.2	Aplicação	45
3.2.1	Sistema de infraestrutura inteligente	45
3.2.1.1	Subsistema de infraestrutura de energia	45
3.2.1.2	Subsistema de infraestrutura de informação	46
3.2.2	Sistema de gerenciamento inteligente	47
3.2.3	Sistema de proteção inteligente	48
3.3	Microrredes	48

3.4	Fontes renováveis de energia	50
3.5	Conclusão	52
4	DATA CENTER E SMART GRID: POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DA OPERAÇÃO DE DATA CENTERS COMO PARTE DA SMART GRID	54
4.1	Potencialidades da Operação de Data Centers em Conjunto à Smart Grids	54
4.1.1	Serviços Ancilares	55
4.1.2	Controle de Demanda	57
4.1.2.1	UPS e Baterias	59
4.1.2.2	Refrigeração	60
4.1.2.3	Equipamentos de TI	61
4.1.3	Corte de carga	62
4.1.4	Fornecimento de energia	63
4.1.5	Outros Serviços	64
4.2	Regulamentação no Brasil	65
4.2.1	Serviços ancilares	65
4.2.2	Microrredes	68
4.2.3	Controle de Demanda	69
4.2.4	Corte de carga	72
4.2.5	Fornecimento de energia em rede de distribuição	73
4.2.6	Regulamentação no exterior	74
4.3	Limitações atuais da Operação de Data Centers em Conjunto à Smart Grids	75
4.3.1	Geradores a Diesel e Chaves de Transferência	75
4.3.2	UPS e Baterias	77
4.3.3	Regulamentação	77
4.3.4	Monitoração e Controle	78
4.4	Conclusão	78
5	MODELAGEM DOS SUBSISTEMAS DE UM DATA CENTER	82
5.1	Carga Crítica	83
5.2	Refrigeração	86
5.3	UPS e baterias	92
5.4	Geradores Reserva	99
5.5	Sistema completo	102
5.6	Conclusão	106
6	ESTUDO DE CASO	108

6.1	Corte de carga parcial	109
6.1.1	Carga crítica	109
6.1.2	Refrigeração	114
6.2	Modulação da carga	117
6.2.1	UPS	118
6.2.2	Refrigeração	125
6.3	Fornecimento de energia	131
6.3.1	UPS	131
6.3.2	Grupo Moto Gerador	135
6.4	Conclusão	138
7	FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE SUPORTE À OPERAÇÃO DE DATA CENTERS	141
7.1	Monitoramento da carga crítica	143
7.2	Monitoramento da refrigeração	144
7.3	Monitoramento do UPS	147
7.4	Monitoramento do Grupo Moto Gerador	149
7.5	Monitoramento Geral de energia	150
7.6	Conclusão	152
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	155
	REFERÊNCIAS	159
	APÊNDICES	166
	APÊNDICE A – FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEIS	167
A.1	Geração de Energia Solar	167
A.2	Geração de Energia Eólica	171
	APÊNDICE B – CÓDIGOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES	175
B.1	Operação com corte de carga total de carga	175
B.1.1	Bloco UPS	175
B.1.2	Bloco Gerador	175
B.2	Operação com corte de carga parcial de carga de TI	176
B.2.1	Bloco UPS	176
B.3	Operação com corte de carga parcial de carga de refrigeração	177
B.3.1	Bloco Refrigeração	177
B.4	Operação com modulação de carga pelo UPS	177
B.4.1	Bloco UPS	177

B.5	Operação com modulação de carga pela refrigeração	178
B.5.1	Bloco Refrigeração	178
B.6	Operação com fornecimento de energia das baterias (UPS) . . .	179
B.6.1	Bloco UPS	179
B.7	Operação com fornecimento de energia pelo grupo moto gerador	179
B.7.1	Bloco Grupo Moto Gerador	179

1 INTRODUÇÃO

Ambientes que necessitam de operação ininterrupta e sua parada representa desde perdas materiais, conformidade legal e até, em casos extremos, perdas de vidas, são classificados como ambientes de missão crítica (KOSIK, 2015). Alguns exemplos destes ambientes são *data centers*, hospitais, laboratórios, instalações militares, fabricas, entre outros. Estes ambientes precisam operar continuamente e são classificados por sua disponibilidade.

Dentre os ambientes de missão crítica, os *data centers* apresentam grande destaque. Com a evolução da tecnologia, o mundo moderno está cada vez mais dependente de sistemas cibernéticos. Estes, essenciais para a sociedade atual, são baseados em computadores e redes de comunicação. Para a melhor gerência e disponibilidade deste tipo de serviço, ambientes especializados em comportar estas tecnologias são criados e vêm se expandindo em todo o mundo. Estes ambientes, conhecidos como *data centers*, são dedicados a fornecer serviços de computação com alta disponibilidade.

Avanços importantes também são notados no campo da geração, transmissão e distribuição de energia. Redes adaptativas, tolerante a falhas e com maior tempo de disponibilidade são desenvolvidas e estudadas para comportar novas fontes de geração e trazer maior qualidade no serviço de fornecimento de energia elétrica. Estas redes inteligentes, conhecidas como *smart grids*, são concebidas de forma a aumentar a visibilidade de componentes através de monitoramento e automatizar a resposta a falhas e restabelecimento. Também, as redes inteligentes, utilizando das novas ferramentas proporcionadas pelo avanço da tecnologia, trarão maior flexibilidade aos consumidores, que poderão dispor de monitoramento e alternativas para aquisição de energia elétrica dentro do mercado. Com o objetivo de preparar a rede elétrica para alta inserção de geração através de energia renovável, as *smart grids* deverão também possuir armazenamento de energia, proteção, auto correção automáticas, processamento eletrônico e fluxo de energia bidirecionais.

Data centers e *smart grids* são conceitos que podem ser analisados em conjunto. Ambientes de *data center* já estão na vanguarda do emprego de tecnologia para melhorar a supervisão e mitigar falhas. Este ambientes são expressivos no consumo global de energia elétrica, representando 3% da energia elétrica total consumida no mundo em 2017, cerca de 416 TW de potência (DANILAK, 2017). Enquanto isso, *smart grids* são desenvolvidas para atender à necessidade de inclusão de fontes renováveis de energia, e tratam desafios como o aumento da disponibilidade da rede e resolução de falhas de forma automática, tão importante a *data centers*. A

relação entre estes dois conceitos vai além, visto que para armazenar e processar a informação adquirida através de monitoramento da rede inteligente, *data center* serão essenciais no fornecimento de serviços virtuais e capacidade computacional.

Nesse sentido, o trabalho aqui exposto visa contribuir para estes universos, que são multidisciplinares e complexos, em termos de suas melhorias de disponibilidade e resiliência. Este capítulo se dedicará à definição do problema que será tratado, sua justificativa e os objetivos que o trabalho busca. O formato do trabalho será organizado em capítulos auto-contidos, com a recapitulação de conceitos necessários para a compreensão do leitor, com o objetivo de que estes possam ser entendidos no conjunto do texto ou separadamente. Este trabalho se baseia no funcionamento e operação de ambientes de *data center*, mas os conceitos tratados poderão ser transpostos a outros ambientes de missão crítica que possuam características semelhantes de infraestrutura elétrica de suporte a disponibilidade.

1.1 Justificativa

O mercado de *data centers*, no Brasil e no mundo, tem crescido de forma rápida. Com isso, formas de aumentar sua eficiência e disponibilidade vêm sendo desenvolvidas para tornar sistemas computacionais em nuvem mais confiáveis e acessíveis.

Para o aumento da disponibilidade destes ambientes, é de grande importância que a análise do impacto do funcionamento de *data centers* inseridos no contexto de *smart grids* seja estudada. Neste cenário, a verificação das possibilidades de ambientes de *data center*, que possuem alta densidade energética, arquitetura complexa e subsistemas de suporte, pode trazer novas formas de auxílio à *smart grid*, principalmente em sua resiliência, que é um desafio visto a alta penetração de fontes renováveis de energia, como solar e eólica. Desta forma, benefícios para a rede e para a carga podem ser atingidos quando estratégias de serviços ancilares para este modelo forem analisadas e formatadas.

Da perspectiva de arquitetura para fornecimento de energia elétrica, *data centers* são projetados de forma particular às demais cargas por serem classificados com ambientes de missão crítica, devido ao custo da indisponibilidade de seus serviços. Por esse motivo, estes ambientes possuem várias estratégias implementadas para minimizar o tempo de parada, como geradores próprios reserva, armazenamento de energia, duplicação dos circuitos de alimentação, entre outros. Esta estrutura, que é formatada para suportar o *data center*, também pode ser explorada para suporte à rede elétrica, e com a penetração das *smart grids*, essa possibilidade e sua remuneração tornam-se cada vez mais notáveis.

Neste contexto, *data centers* podem ajudar a resiliência da *smart grid*. A infraestrutura elétrica de suporte dos *data centers* se torna um investimento justificado quanto maior for o custo da indisponibilidade de seus serviços. Este investimento já previsto pode ser empregado não só na disponibilidade do ambiente, mas para o fornecimento de serviços ancilares. Desta forma, quando conjuntos de *data centers* aderirem ao fornecimento de serviços ancilares, estes também se beneficiarão, podendo diminuir o tempo de parada de seus sistemas, o custo de operação e supridos por uma rede mais estável e segura.

1.2 Definição do problema

Com o avanço da computação em nuvem, os *data centers* ganharam destaque e prioridade em empresas de todo o mundo. O objetivo da computação em nuvem é concentrar processamento e armazenamento em *data centers* que ligam máquinas de alta performance através de conexões de banda larga (WANG; UEHARA; SASAKI, 2015).

Data Centers causam grandes prejuízos quando param de prover seus serviços e, por isso, são avaliados pelo tempo que estão operando, ou seja, o tempo disponível. Para aumentar a disponibilidade de um *data center*, várias estratégias são tomadas. Entradas redundantes de energia (concessionária e geradores reserva), sistemas de fornecimento de energia ininterrupta, circuitos redundantes de alimentação de carga, entre outros, são largamente utilizados para suprir esta necessidade.

Para estes ambientes, o fornecimento de energia elétrica de qualidade é o fator principal que afeta a disponibilidade dos serviços, seguido de falha na conexão lógica (internet) e erros de *software* (UPTIME, 2018). Por esse motivo, *data centers* estão na vanguarda da implantação de redes de supervisão de grandezas elétricas. Este movimento é aderente ao conceito de *smart grids*, tendência nas instalações elétricas ao redor do mundo. Com o intuito de aumentar a disponibilidade, a integração dos elementos de rede elétrica com a infraestrutura de informação já é aplicada, através da implantação de gerenciadores de infraestrutura de *data centers* (DCIM - *Data Center Infrastructure Management*). Mesmo sendo convergentes em vários aspectos, cargas como *data centers* são expressivas no total do consumo de energia elétrica, e causam grande impacto nas redes de distribuição em que estão instalados. Por isso, manter cargas deste tipo em redes inteligentes sem que afetem (e até mesmo ajudem) a sua resiliência em momentos de desequilíbrio entre geração e consumo é o desafio que pretende-se analisar. Nestes casos, em que a rede poderá enfrentar problemas em fornecer toda energia demanda pelo conjunto de cargas suprida, a exploração de formas com que *data centers* poderão contribuir para o equilíbrio entre demanda e

geração trará novas possibilidades para a implantação da *smart grid*.

Desta forma, o estudo de estratégias para aumentar a disponibilidade de tais ambientes e como estes ambientes podem contribuir inseridos em contexto de *smart grids* torna-se importante na medida em que as redes inteligentes se tornam populares e que *data centers* crescem em complexidade. Evidencia-se assim a necessidade de avaliação de como este tipo de carga irá interagir com redes de distribuição com grande inserção de geração distribuída e fontes renováveis de energia e qual serão seus efeitos na robustez da rede elétrica e na qualidade de energia. Através desta análise, será possível adaptar ferramentas DCIM para auxiliar gestores de *data centers* na avaliação de custos e melhorias de operação em conjunto com redes inteligentes.

1.3 Objetivo geral

O objetivo do trabalho é realizar um estudo da operação de *data centers* no contexto de *smart grids*. Este estudo deverá avaliar os impactos deste tipo de carga (*data centers*) na rede elétrica quando operados de forma inteligente e identificar quais as possibilidade que cargas como *data center* têm para ajudar a rede elétrica. Além disso, deverá verificar como a operação destes ambientes sofrerá impacto e como poderá auxiliar a rede elétrica para aumento da resiliência e disponibilidade, fator importante a ser considerado com o aumento de fontes renováveis de energia.

1.4 Objetivos específicos

Para que se alcance o objetivo citado acima, traçaram-se os seguintes objetivos específicos que devem ser alcançados ao longo deste trabalho:

- a) Analisar as arquiteturas elétricas dos *data centers*, sua classificação com relação à disponibilidade e os diferentes subsistemas elétricos utilizados para o aumento da disponibilidade de *data center*;
- b) Analisar as características da *smart grid*, através de suas aplicações e cenários, e o que motiva a adoção de novas estratégias de gerenciamento da rede elétrica além daquelas tradicionais e já bem estabelecidas;
- c) Analisar as potencialidades e limitações que poderão ser encontradas quando *data centers* operam no contexto da *smart grid* e como estas cargas afetarão a rede elétrica, assim como os aspectos legais e normativas vigentes para este tipo de serviço e as necessárias para que esta operação seja formalizada;

- d) Modelar os diferentes subsistemas que compõem um *data center*, com o objetivo de simular cenários de operação de *data centers* que trazem vantagens à *smart grid*;
- e) Identificar os diferentes cenários em que *data centers* poderão auxiliar a *smart grid* e simular sua operação;
- f) Estruturar os parâmetros necessários para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de suporte à operação de *data centers* em conjunto com redes inteligentes, definindo os parâmetros necessários que deverão ser considerados e poderão trazer valor a gerentes de *data center* que desejarem operar seus sistemas em condições de suporte à *smart grid*.

2 DATA CENTERS: CONCEITO E ARQUITETURAS

Com o aumento da internet e da computação em nuvem, ambientes que dão suporte a tecnologia de informação, os *data centers*, vêm sendo popularizados em todo o mundo em grande velocidade. Estes ambientes são conhecidos por sua característica de missão crítica, isto é, projetados e construídos para minimizar a probabilidade de paradas, e, por isso, avaliados por sua disponibilidade. Este capítulo tem, como objetivo, apresentar estes ambientes e suas classificações, focando nas suas estruturas elétricas de suporte à disponibilidade.

Serão demonstrados nesse capítulo a origem do conceito de *data centers*, sua classificação segundo a norma vigente no Brasil, os subsistemas utilizados para suporte à disponibilidade do ambiente, assim como suas arquiteturas. Por fim, serão mostradas as métricas mais utilizadas para a avaliação destes ambientes em relação a sua eficiência, no que diz respeito ao consumo de energia elétrica.

2.1 Histórico e contextualização de *data centers*

O primeiro computador digital eletrônico, ENIAC (*Electrical Numerical Integrator and Computer*), entrou em funcionamento em 1946, para a computação de cálculos balísticos. Nesta época, os computadores eram grandes e espaçosos, e o ENIAC ocupava 180m² de área construída (TERRA, 2006).

Nos anos subsequentes, novos computadores foram desenvolvidos e a complexidade de manutenção e operação destes equipamentos levou à construção de salas dedicadas com refrigeração e cabeamento elétrico próprios. Como, na sua maioria, eram utilizados para aplicações militares, estes ambientes foram projetados para serem controlados e seguros. Dessa forma, o conceito de *data centers* foi criado e começou a se desenvolver.

Com a miniaturização dos computadores na década de 80, o uso destes equipamentos se popularizou e ganhou escala. Aplicações como processamento de clima, aviação civil, contabilidade e outros tiveram papel importante neste processo. Em 1993, o Instituto *Uptime*, originário do *Uninterruptible Uptime Users Group* (UUUG) foi criado como uma instituição neutra para pesquisa, educação e consultoria para *data centers*. Este instituto criou a primeira certificação para estes ambientes, com relação ao seu projeto e disponibilidade (BALODIS; OPMANE, 2012).

Na atualidade, *data center* é um conceito bem definido de espaço e infraestrutura que abriga e dá suporte a computadores e equipamentos de tecnologia

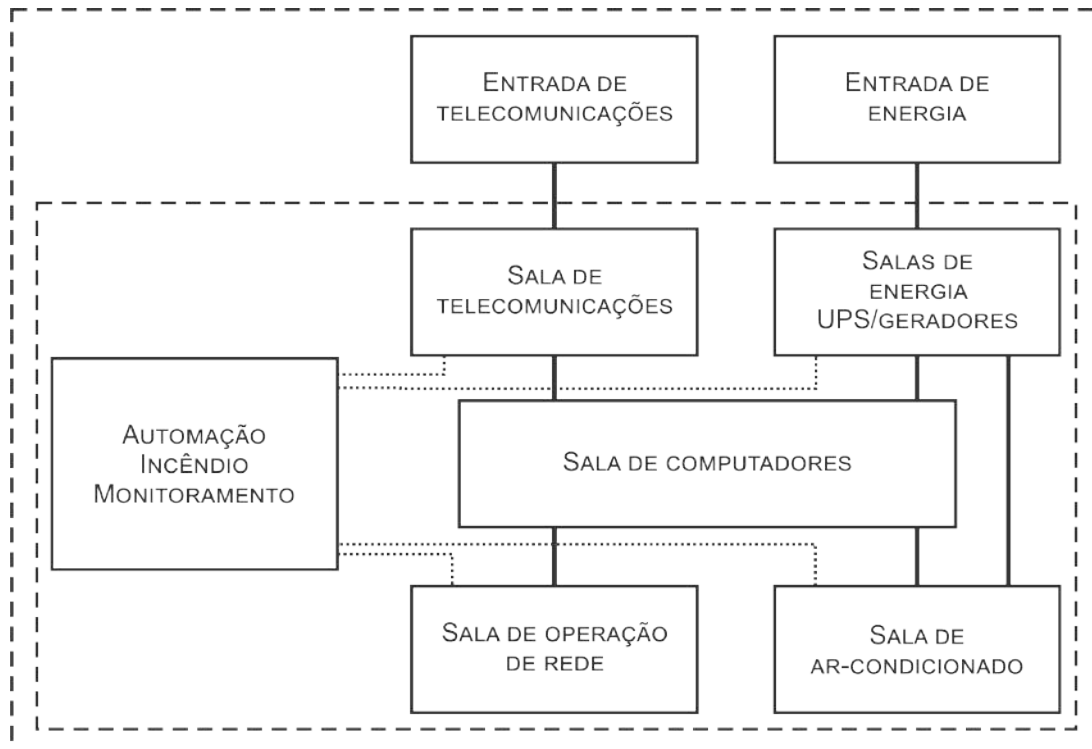
de informação (TI) necessários para processamento e armazenamento de informações, assim como sua disponibilização em redes de computadores ([KERRAVALA, 2017](#)).

2.2 Classificação

Data center é um tema amplo, por tratar-se de ambientes multidisciplinares que englobam diferentes ramos da engenharia e computação, entre outras áreas de conhecimento. Para a classificação e certificação destes ambientes, diferentes entidades normativas propõem métodos de avaliação.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é responsável pela normatização técnica. No conjunto de normas disponibilizadas pela ABNT está a NBR 14565 que trata de cabeamento estruturado para edifícios comerciais e *data centers*. Dividida em prefácio, escopo, doze seções e seis anexos, ela trata da estrutura do cabeamento, desempenho dos enlaces, características eletromagnéticas, entre outros. Sobre a estrutura elétrica de um *data center*, se destaca o Anexo F (melhores práticas para projeto e instalação de infraestrutura para *data centers*). Segundo o Anexo F da norma NBR 14565, um *data center* é composto de espaços que podem ser essenciais à operação ou de suporte. Como pode ser visto na [Figura 1](#), a composição de um *data center* é feita por vários ambientes que trabalham em conjunto para fornecer condições de operação à sala de computadores, principal ambiente do sistema ([ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013](#)). Na figura, o quadro pontilhado externo representa o macro conjunto em que o *data center* está inserido e o quadro pontilhado interno, o *data center* em si. As conexões elétrica e de dados são representados pelas linhas sólidas, e as conexões lógicas entre os subsistemas de suporte e segurança são representadas pelas linhas pontilhadas.

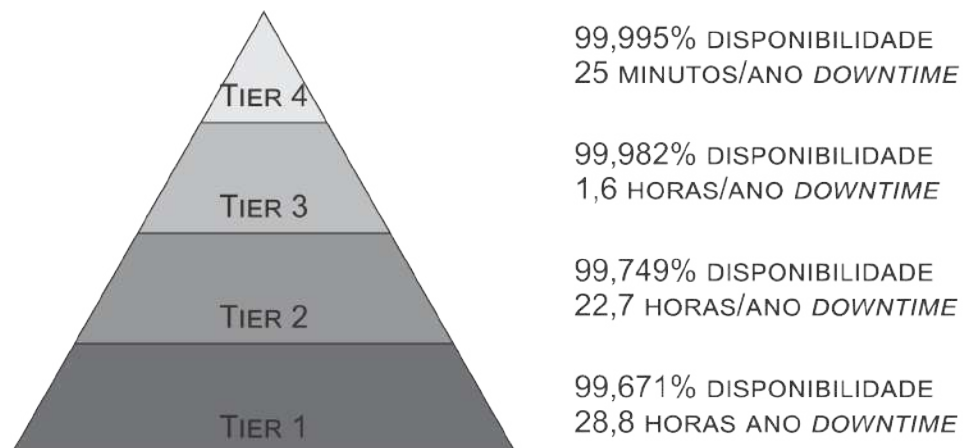
Figura 1 – Ambientes de um *data center*.



Fonte: Adaptado de [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#).

Com relação à disponibilidade, a NBR 14565:2013 se referencia à classificação desenvolvida pelo Instituto *Uptime*, que adota quatro níveis de classificação. Na [Figura 2](#) é possível verificar a relação existente entre a classificação do *data center* e sua disponibilidade, divulgada pela [UPTIME INSTITUTE LLC \(2018\)](#). A seguir, a classificação existente de *data centers* conforme sua característica de estrutura elétrica.

Figura 2 – Classificação Tier de *data center*.



Fonte: Adaptado de [UPTIME INSTITUTE LLC \(2018\)](#).

2.2.1 Tier I: Básico

Um *data center* classificado como Tier I disporá de sistemas de distribuição e refrigeração para a sala de computadores, mas poderá ter ou não sistema de geração de energia e *Uninterruptible Power Supply* (UPS). Se estes existirem, serão individuais e projetados para suportar a carga total do *data center*. Situações de manutenção e emergência, como falhas de operação e infraestrutura causam parada de operação ([ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013](#)).

2.2.2 Tier II: Componentes redundantes

Data Centers classificados como Tier II possuem necessariamente equipamentos de suporte à disponibilidade e estes são configurados de forma N+1. Possuem sistemas de distribuição de energia e refrigeração para a sala de computadores, sistema de geração secundária e UPS. Não possuem redundância de caminhos de alimentação para as cargas. Estes *data centers* são menos susceptíveis a interrupções, sejam elas planejadas ou não ([ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013](#)).

Com relação ao projeto elétrico, o sistema de UPS e geradores será concebido para carga total mais um equipamento reserva, em caso de falha de um dos equipamentos principais (configuração N+1).

Estes ambientes possuem características de suportar paradas para a manutenção dos equipamentos elétricos mas, para a manutenção no encaminhamento de distribuição de energia exigem planejamento prévio para prevenir interrupções parciais e totais.

2.2.3 Tier III: Sustentação Simultânea

Este tipo de *data center* dispõem de componentes redundantes N+1, similares aos classificados como Tier II, e também caminhos redundantes de distribuição de energia. Por este motivo, suportam atividades de manutenção planejada em seus subsistemas. Não são resistentes a falhas, pois somente um caminho de distribuição é mantido em operação (o caminho redundante mantém-se inativo) ([ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013](#)).

2.2.4 Tier IV: Tolerante a falhas

Um *data center* Tier IV possui infraestrutura que deve permitir qualquer atividade de manutenção planejada sem a interrupção das cargas críticas (sala de

computadores). Este, para ser considerado tolerante a falhas, deverá possuir caminhos de distribuição diferentes atuando simultaneamente, numa configuração $2(N+1)$, ou seja, cada caminho elétrico deverá possuir um conjunto $N+1$ de sistemas de suportes (UPS e geradores). Neste tipo de *data center*, é obrigatório que cada equipamento de TI possua fonte redundante de alimentação de energia ([ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013](#)).

2.3 Estruturas de suporte à disponibilidade

As consequências da indisponibilidade de um *data center* não podem ser mensuradas somente em termos de custo de substituição de equipamentos e trabalho de conserto de problemas, mas também refletem em custos de sistemas inoperantes (*downtime*) e reputação de organizações, que podem ser difíceis de serem mensurados ([WIBOONRAT, 2008](#)). Por esse motivo, estratégias para aumentar o tempo disponível de *data centers* são adotadas. Como a principal causa da indisponibilidade destes ambientes é a falta de energia pela distribuidora, representando 36 % dos casos de falha dos maiores *data centers*, equipamentos de armazenamento e geração de energia são adicionados a planta de *data centers* para suprir a necessidade de eletricidade durante o período de falta de fornecimento ([UPTIME, 2018](#)).

Além disso, em *data centers* que requerem níveis de disponibilidade altos e possuem configuração Tier IV, equipamentos pertencentes a carga crítica são dotados de entrada de energia redundantes, para que paradas de manutenção e falhas em circuitos e equipamentos de energia do *data center* tenham a menor probabilidade de afetar seu funcionamento.

A seguir, serão apresentados os principais componentes utilizados na arquitetura elétrica de um *data center*, que têm o propósito de suportar o sistema em situações anormais de fornecimento energia.

2.3.1 UPS e baterias

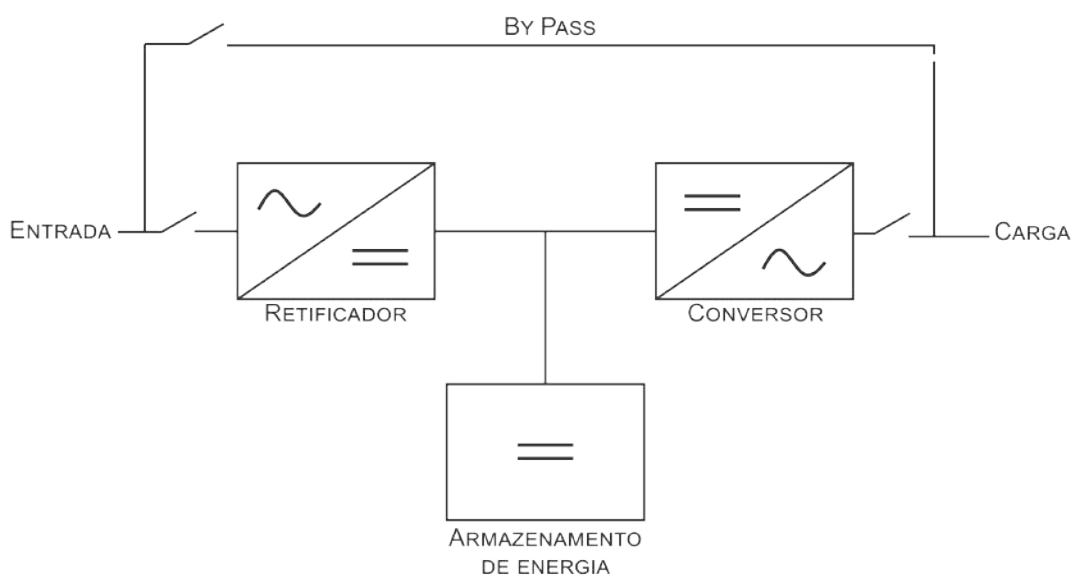
Os UPS são sistemas de alimentação secundários que provém energia elétrica quando há ausência de energia de entrada. Estes sistemas trabalham em conjunto com baterias e são responsáveis por carregar as baterias quando a fonte de energia está presente e descarregar as baterias quando a distribuidora se torna indisponível.

O tempo de fornecimento de energia que o UPS irá suportar na ausência de alimentação irá depender da capacidade do banco de baterias instalado e da energia descarregada pela carga durante este período. Segundo a [Associação Brasileira de](#)

[Normas Técnicas \(2013\)](#), os UPS destinados para *data centers* devem possuir capacidade estimada de bateria para no mínimo 15 minutos de funcionamento da carga. Isso se dá porque, no caso de ausência da rede principal, o sistema de UPS deverá prover energia até que os geradores auxiliares entrem em operação e sincronia, restabelecendo a energia para o UPS e os equipamentos críticos. Além disso, a norma sugere que o UPS deve atuar de forma *on line* (sempre efetuando a conversão de energia) , trifásico e com operação contínua.

Além da principal funcionalidade do UPS descrita acima, estes sistemas também contribuem para a qualidade de energia fornecida aos equipamentos críticos. Devido a sua operação, a tensão de entrada, que é CA, é convertida através de um retificador para um barramento CC em que as baterias estão conectadas. Dessa forma, as baterias podem ser carregadas ou descarregadas, dependendo da necessidade. Após este estágio, a tensão é novamente convertida por um inversor para CA e distribuídas às cargas críticas, como exemplificado na [Figura 3](#).

Figura 3 – Diagrama de blocos típico de funcionamento do UPS.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Para a manutenção e troca de baterias, os sistemas UPS são instalados com um caminho de energia alternativo, conhecido como *by pass*. Este caminho deve se manter desativado em operação normal, mas entrará em operação em casos de intervenção nos equipamentos de UPS. Existem modelos que possibilitam a troca e manutenção de baterias com o sistema de UPS energizado e operante, esta funcionalidade é chamada de *hot swap*.

A tecnologia de baterias utilizada em sistemas de UPS para *data center* é a de chumbo ácido. Esta tecnologia de bateria, já consolidada no mercado, é escolhida

para este tipo de sistemas porque tem a capacidade de atender aos requisitos técnicos necessários, como suportar cargas de maior potência. Além disso, este tipo de bateria, por ser amplamente utilizada e ter maior maturidade tecnológica, possui o melhor custo benefício comparado com outros armazenamentos de energia. Contudo, as baterias de chumbo ácido possuem também desvantagens, como por exemplo a manutenção de uma temperatura de 20 °C para funcionamento com máxima eficiência, a consideração do peso das baterias quando projetados os espaços em que estas serão instaladas, vida útil pequena (em média 3 anos) e maior custo ambiental quando comparada com outras tecnologias como as de íons de lítio. As baterias de íons de lítio começaram a ser empregadas em ambientes de *data center* na última década, mas o custo desta tecnologia comparada a baterias de chumbo ácido continua maior, podendo inviabilizar sua substituição. Apesar deste novo tipo de bateria operar em temperatura de 30 °C, diminuindo os custo de refrigeração, possuir maior tempo de vida útil, menor peso e menor custo ambiental, estas ainda são vistas como tendência não consolidada, devido ao seu custo de obtenção (COLOCATION AMERICA, 2019).

2.3.2 Grupo Motogerador

Em períodos de falta de energia proveniente da concessionária, *data centers* possuem (dependendo de sua estrutura e necessidade de disponibilidade) uma ou mais fontes secundárias de geração de energia. Este tipo de geração entra em operação quando há a detecção de ausência de energia de entrada, realizado automaticamente por chaves de transferência.

Geradores devem prover energia para a capacidade plena do *data center*, em casos de falta de energia da concessionária, incluindo alimentação para o UPS, iluminação e equipamentos condicionadores de ar (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Por esse motivo, estes geradores precisam da capacidade de entrar em operação sem a existência de rede elétrica, e geralmente são utilizados geradores a diesel, gasolina ou gás como fonte primária de energia.

Data centers não precisam obrigatoriamente ter sistemas de geração de energia secundária. Quando não possuem, são classificados como tier I. A partir da classificação tier II, é obrigatório que estes sistemas sejam implantados.

Além do aumento de disponibilidade, geradores também são utilizados em períodos de ponta, em grandes *data centers*, classificados no grupo tarifário A. Estes *data centers* têm sua entrada de energia em média tensão, e são tarifados de forma binômia (PROCEL EPP, 2011). Com a ajuda dos geradores, é possível controlar a demanda do *data center*, do ponto de vista da concessionária, para que não haja ultrapassagem entre a potência demandada e a contratada. Este assunto será abordado

na [subseção 4.2.3](#).

Para prevenir problemas de falha dos geradores, é recomendado pela norma ensaios periódicos quinzenais. Dependendo do nível de disponibilidade requerido pelo *data center*, geradores reserva são instalados em configuração N+1 ou 2(N+1), como explicado na [seção 2.2](#). Isto se dá para que seja possível substituir geradores em caso de necessidade sem detrimento à carga crítica. Além disso, é recomendado pela norma que tanques de combustível sejam instalados com capacidade de suportar a carga do *data center* por completo em um período mínimo de 24 horas.

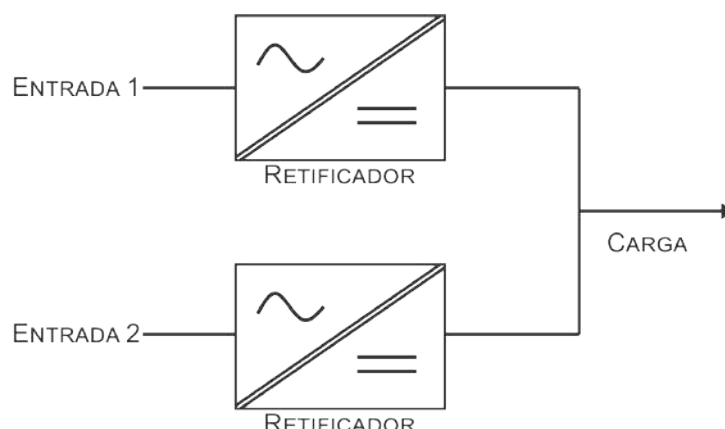
2.3.3 Fontes de alimentação redundantes para equipamentos críticos

As cargas principais de um *data center* são os equipamentos de TI. Estes são responsáveis pelo trabalho útil do *data center*, que é o processamento e armazenamento de informações. Exemplos desses equipamentos são servidores, *storages*, *switches* e roteadores. Como são os equipamentos críticos, estes são alimentados pelo sistema de UPS, que, em conjunto com a fonte secundária de energia, provém a disponibilidade necessária para estes dispositivos.

Todo o processamento de informação é feito de maneira eletrônica, e, por isso, estes equipamentos trabalham com padrões de tensão contínua (CC). Tradicionalmente, a tensão de alimentação de *data centers* é alternada, e cada um destes equipamentos precisa possuir um conversor CA-CC em sua entrada de alimentação. Além disso, os níveis de tensão de equipamentos de TI são relativamente inferiores aos trabalhados na distribuição de energia, mesmo em baixa tensão (220 Vca/110 Vca). Equipamentos eletrônicos geralmente trabalham com níveis de tensão entre 48 Vcc a 3,3 Vcc ([DAYARATHNA; WEN; FAN, 2016](#)), adicionando mais estágios na conversão de energia das fontes de alimentação.

Para aumento da disponibilidade, estes equipamentos podem ser adquiridos com fontes redundantes de energia. Dessa forma, o equipamento possuirá duas entradas de energia distintas que funcionam simultaneamente. Caso uma das entradas de energia fique indisponível, a outra assumirá a carga do equipamento e evitará o desligamento. Um diagrama simplificado de uma fonte de energia redundante, com duas entradas distintas, é apresentado na [Figura 4](#).

Figura 4 – Diagrama de blocos de funcionamento de uma fonte redundante.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Essa topologia é obrigatória em *data centers* classificados como tier IV. Ambientes com esse nível de disponibilidade possuem topologia de suporte elétrico do tipo $2(N+1)$, como descrito na seção 2.2.4, e caminhos distintos de distribuição de energia. Fontes redundantes são essenciais para que o equipamento se beneficie dessa configuração.

2.3.4 Refrigeração

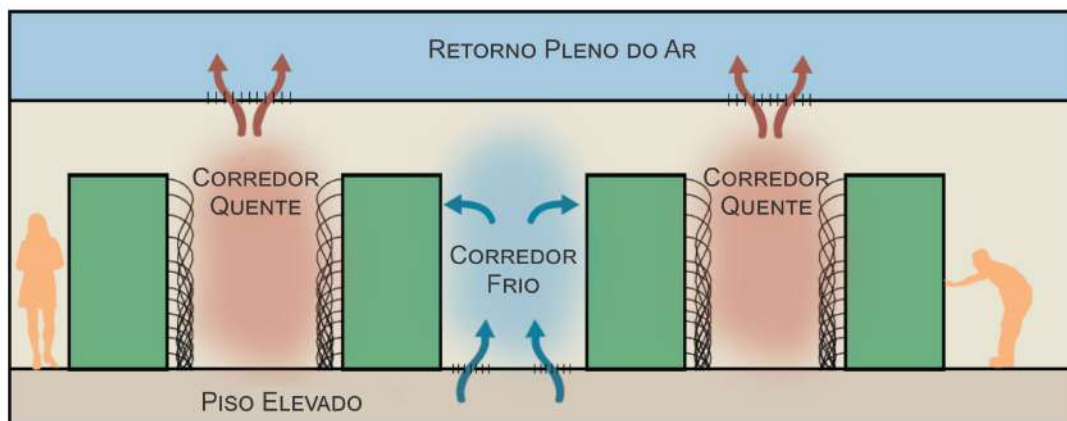
O sistema de refrigeração de ar é essencial para o funcionamento de um *data center*. Como estes ambientes possuem alta densidade energética, seu consumo de energia pode ser comparado, dependendo de seu tamanho, com 100 a 200 ambientes de escritório (DAYARATHNA; WEN; FAN, 2016). A energia consumida pelo *data center* é utilizada para processamento de informação, e por sua vez dissipada em forma de calor. Por esse motivo, é necessário que o sistema de refrigeração, de forma eficiente, retire o calor do ambiente, e sem a refrigeração adequada, o *data center* perde eficiência e disponibilidade.

Quando o sistema de refrigeração é projetado adequadamente, este pode reduzir custos de operação, aumentar a densidade energética do ambiente e reduzir interrupções e falhas de processamento. Os principais pontos a serem considerados incluem a configuração dos equipamentos em corredores quentes e frios, a localização do suprimento e retorno de ar, o fluxo de ar dentro do ambiente e as definições de temperatura e umidade do ambiente (VANGEET; TSCHUDI, 2011).

A disposição dos equipamentos em corredores isolados e o insuflamento de ar através do piso elevado são estratégias bem consolidadas e recomendadas por vários órgãos, dentre eles, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013), vigente

no Brasil. Na [Figura 5](#), é apresentado um esquema da dinâmica térmica do *data center*, quando utilizada estratégia recomendada na norma.

Figura 5 – Configuração da refrigeração em *data centers*.



Fonte: Adaptado de [VanGeet e Tschudi \(2011\)](#).

Além disso, a norma brasileira especifica os limites de temperatura e umidade, que deverão estar nos intervalos de 18 °C e 27 °C de temperatura e 30% e 60% de umidade relativa do ar, com base nas recomendações e melhores práticas da ASHRAE ([AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2009](#)). Estes limites são adotados pelos *data centers* brasileiros, mas é comum encontrar *data centers* trabalhando muito próximo dos limites inferiores de temperatura descritos na norma. Isso acontece geralmente quando não há um monitoramento constante da temperatura em diversos pontos do ambiente, e é realizado para a prevenção de pontos focais de calor (*hotspots*).

2.4 Arquiteturas x Disponibilidade

Como é possível verificar na seção [2.2](#), a disponibilidade de um *data center* pode ser avaliada através de sua classificação. Por sua vez, a classificação é realizada pela arquitetura e projeto do *data center*, que são determinantes para estimar quão susceptível a operação de um *data center* está com relação ao tempo fora de operação (*downtime*). A seguir, são apresentadas as estruturas elétricas de *data centers* conforme a sua classificação segundo a norma brasileira.

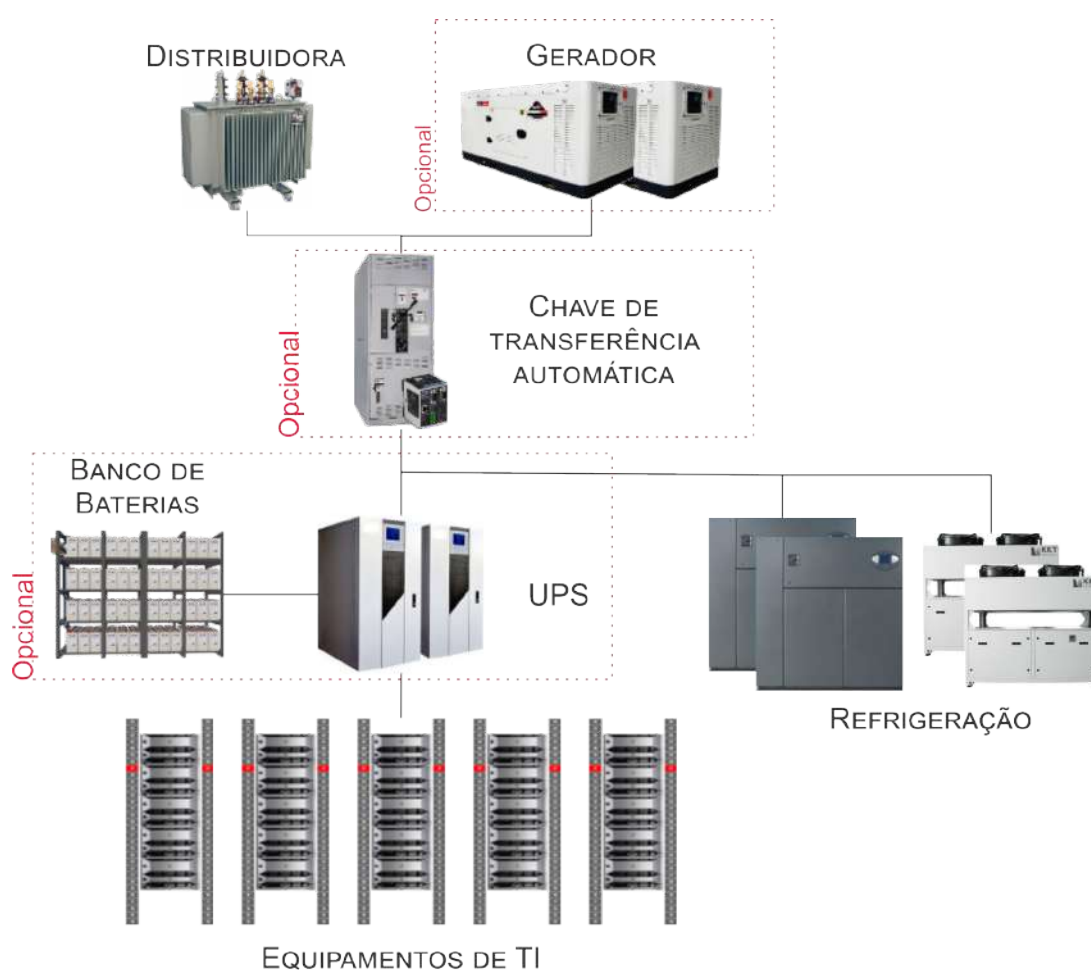
2.4.1 Arquitetura Tier I

Data centers do tipo tier I são os mais simples de serem projetados e construídos. Na maioria das vezes, possuem equipamentos de suporte a

disponibilidade, mas estes não possuem nenhum tipo de redundância e sua parada ocasiona a parada de funcionamento dos computadores. Manutenções dos componentes elétricos causam parada no sistema e devem ser planejadas. Do ponto de vista da eficiência do UPS, fontes de alimentação dos equipamentos e refrigeração, dependerão do total da carga, não havendo redundância destes equipamentos.

A arquitetura destes *data centers* é apresentada na [Figura 6](#). É possível observar que o sistema de UPS e de geração secundária são opcionais, fazendo com que a média de disponibilidade para essa estrutura seja de 99.671%, segundo o [UPTIME INSTITUTE LLC \(2018\)](#).

Figura 6 – Esquemático da arquitetura de um *data center* tier I.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

2.4.2 Arquitetura Tier II

Os *data centers* projetados como tier II têm ganhos de disponibilidade com relação aos *data centers* tier I. Nesta classificação, é obrigatório que os ambientes tenham UPS e geração secundária para dar suporte ao ambiente em configuração

N+1. Nesta configuração, os sistemas de suporte são projetados para suportar a carga, além de um equipamento auxiliar que ficará suspenso e entrará em funcionamento caso um dos componentes do sistema principal sofra manutenção ou falhe. Por esse motivo, ambientes classificados como tier II possuem disponibilidade de 99,749% do tempo, e tempo de parada estimado de 22,7 horas ao ano.

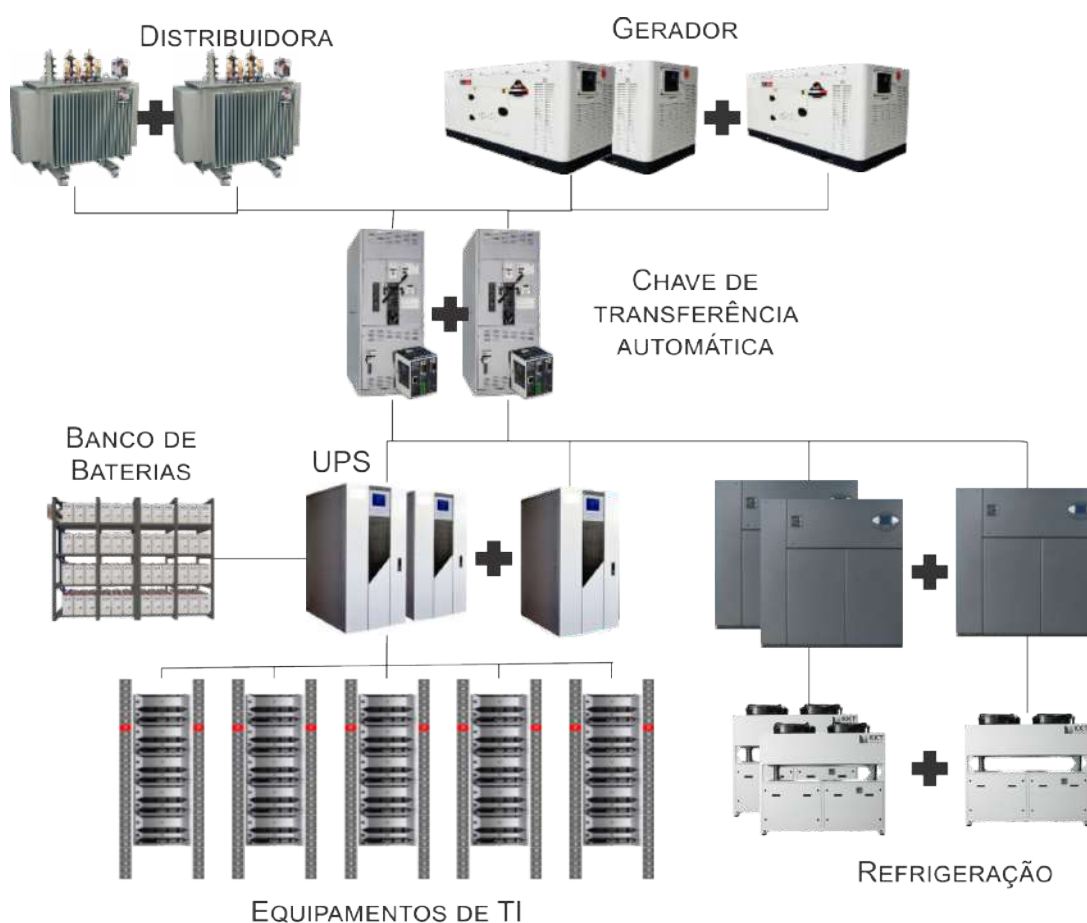
Com relação a eficiência, o sistema de UPS será projetado para carga total mais um UPS reserva, em caso de falha de um dos UPS principais. Quando todos os UPS são mantidos ativos, a carga será dividida entre os mesmos e o fator de carga relacionado a cada UPS será menor, afetando a eficiência do sistema total.

As fontes de energia dos equipamentos trabalharão com o mesmo fator de carga que um *data center* Tier I, não havendo perdas de eficiência neste quesito, e fontes redundantes de energia não apresentarão ganho na disponibilidade do equipamento, visto que não existem caminhos redundantes de energia.

Para a refrigeração projetada com especificações N+1, o equipamento de refrigeração sobressalente geralmente é mantido em modo *stand by*. Desta forma, mais energia é gasta com o sistema, mas minimizado pelos modos de economia de energia inerentes dessa função. É possível a utilização de rodizio de máquinas de ar nessa configuração, que não traz diferenças consideráveis à eficiência como um todo, dependendo das características de consumo de energia de entrada e saída de operação de cada máquina.

A medida que a classificação sobe, a estrutura elétrica se torna mais complexa, conforme é possível observar na [Figura 7](#).

Figura 7 – Esquemático da arquitetura de um *data center* tier II.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

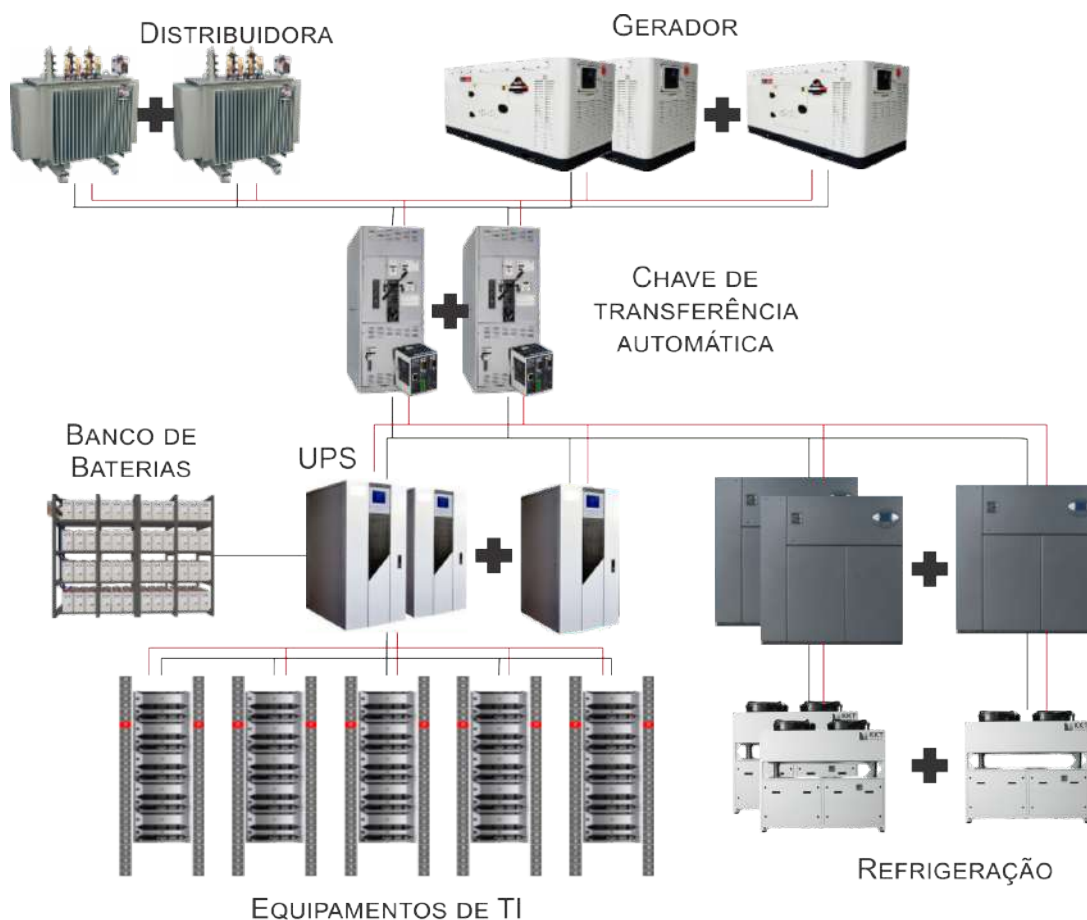
2.4.3 Arquitetura Tier III

Na classificação tier III, os *data centers* precisam ter os componentes de suporte à disponibilidade similares aos classificados como tier II em configuração N+1, e também caminhos redundantes de encaminhamento energético. Nesta classificação, um destes caminhos é mantido inativo, e só é utilizado conforme necessidade de manutenções programadas. Neste caso, é possível haver ganhos de disponibilidade no uso de fontes redundantes dos equipamentos, que disporão de caminhos distintos de energia para serem conectados.

Quanto a eficiência energética, os *data centers* tier III mantêm as mesmas características dos *data centers* tier II, visto que os caminhos redundantes de alimentação possuem seu uso alternado.

A [Figura 8](#) apresenta a disposição dos componentes elétricos para esse tipo de *data center*.

Figura 8 – Esquemático da arquitetura de um *data center* tier III.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

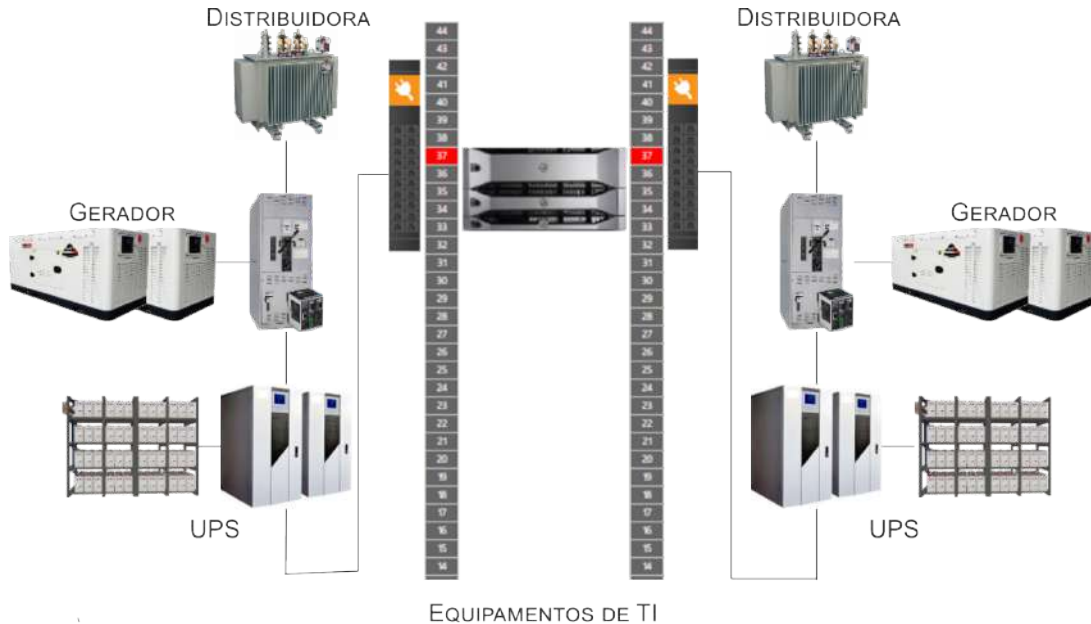
2.4.4 Arquitetura Tier IV

Os *data centers* classificados como tier IV são os mais complexos e custosos de serem implantados. Para adquirir a característica de ser tolerante a falhas e disponibilidade de 99,995% do tempo, estes *data centers* precisam possuir estrutura elétrica $2(N+1)$, o que significa dois conjuntos de equipamentos de suporte a disponibilidade distintos (UPS, geradores e refrigeração), e cada conjunto possuirá um equipamento sobressalente. Neste caso, é obrigatório que os equipamentos eletrônicos possuam fontes redundantes de energia.

Da perspectiva de eficiência energética, este *data center* será o mais ineficiente. Cada conjunto $N+1$ de UPS será submetido, no máximo, a 50% da carga, em condições normais de operação. Além disso, as fontes dos equipamentos de TI também trabalharão com seu fator de carga dividido pela metade, o que traz prejuízos a sua eficiência. A [Figura 9](#) apresenta um esquemático da estrutura elétrica deste tipo de sistema. Nela, é possível verificar que cada equipamento de TI é atendido por 2

circuitos de alimentação diferentes. Cada um destes circuitos é suprido por um conjunto de UPS e geradores independente, com a capacidade de, isoladamente, suportar toda a carga do *data center*.

Figura 9 – Esquemático da arquitetura de um *data center* tier IV.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

2.5 Métricas de Eficiência Energética

Existem inúmeras métricas para a avaliação de performance de *data centers*, como analisado por [Reddy et al. \(2017\)](#). Em relação às métricas de eficiência energética, são avaliados o trabalho útil gerado pelo sistema em relação ao consumo total do ambiente. Além das métricas de eficiência energética, existem métricas de refrigeração, sustentabilidade, performance, rede, armazenamento, segurança e impacto financeiro.

As métricas mais popularmente utilizadas para avaliação de *data centers* são as de eficiência do uso de potência (PUE - *power usage effectiveness*) e eficiência da infraestrutura do *data center* (DCIE - *data center infrastructure efficiency*). Estas métricas são calculadas da seguinte forma:

$$PUE = \frac{P_{total}}{P_{TI}} \quad (1)$$

$$DCIE = \frac{P_{TI}}{P_{Total}} 100\% \quad (2)$$

- P_{total} = Potência de entrada total do *data center*, geralmente coletada nos medidores de energia de entrada da instalação;
- P_{TI} = Potência consumida pelos equipamentos de TI, geralmente coletada nos quadros de distribuição dedicados aos equipamentos da sala de computadores e rede;

É possível analisar que estas métricas, mesmo importantes, não consideram, por exemplo, a eficiência dos processadores, a energia dissipada pelas fontes de alimentação dos computadores ou pelo cabeamento elétrico. Contudo, elas conseguem passar uma visão geral da eficiência do *data center*, levando em consideração que a potência entregue aos equipamentos de TI será usada para produzir trabalho útil, e na potência total estarão inclusos todos os sistemas auxiliares.

Por este motivo, níveis de PUE foram criados. Segundo [The Green Grid \(2012\)](#), existem 3 níveis de PUE classificados com relação a medição de energia dos equipamentos de TI (saída do UPS, quadro de distribuição ou entrada de alimentação dos equipamentos) e periodicidade de medição.

Quanto mais o PUE se aproximar de 1 e o DCIE de 100%, mais eficiente será considerado o *data center*. É impossível chegar nesses valores quando se considera a disponibilidade, porque a infraestrutura irá necessitar refrigeração, UPS, e outros sistemas para manter seu funcionamento contínuo. Segundo [VanGeet e Tschudi \(2011\)](#), o padrão dos *data centers* é possuir um PUE 2 e um DCIE de 50%, ambientes com um bom nível de eficiência alcançam 1,4 de PUE e 70% de DCIE. Já os melhores *data centers* neste quesito chegam a margem de 1,1 de PUE e 90% em DCIE, como mostrado na [Tabela 1](#).

Tabela 1 – Avaliação do valor do PUE e DCIE

Métrica	Padrão	Bom	Melhor
PUE	2,0	1,4	1,1
DCIE	0,5	0,7	0,9

Fonte: [VanGeet e Tschudi \(2011\)](#).

Além da eficiência dos componentes do *data centers*, fatores de localização geográfica e clima também são grandes influenciadores destes valores. Por causa disso, grandes empresas estão migrando suas instalações para lugares de clima frio, como por exemplo o Facebook, que construiu seu primeiro *data center* fora dos Estados Unidos da América, na Suíça, próximo ao círculo polar ártico ([DATA CENTER KNOWLEDGE, 2018](#)).

2.6 Comentários

Data centers são ambientes multidisciplinares que envolvem várias áreas da engenharia em sua operação, como por exemplo refrigeração, elétrica e computação. Estes ambientes complexos e importantes são os responsáveis pela disponibilidade dos sistemas computacionais neles alocados, essenciais na sociedade atual. Neste capítulo, foi abordado o surgimento destes ambientes para compreender a importância dos subsistemas envolvidos e sua motivação dentro da estrutura de suporte à sala de computadores.

Com o entendimento da função dos *data centers*, foi apresentada a principal característica destes ambientes, que é a sua disponibilidade. Como estes ambientes são principalmente afetados pela disponibilidade de energia elétrica, foi demonstrado as classificações destes ambientes com relação a sua estrutura elétrica de acordo com o nível de redundância dos componentes elétricos que este possui. Estes componentes, que são o UPS, grupo moto gerador, fontes redundantes dos equipamentos de TI e refrigeração, foram então descritos para esclarecer como interagem e sua importância à disponibilidade da sala de computadores.

Com estes conceitos, foi possível então demonstrar como estes se relacionam em cada classificação. Nesta etapa, foram apresentadas as classificações segundo a NBR 14565 da [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#) e a estrutura elétrica necessária para atingir a disponibilidade necessária. Para avaliação destes sistemas, métricas importantes foram descritas com o objetivo de mensurar a eficiência elétrica de *data centers*.

Através deste estudo, concluí-se que a estrutura de *data centers* possuem vários elementos importantes utilizados com o objetivo principal de manter a sua operação contínua. O conhecimento destes subsistemas é fundamental para aplicá-lo de acordo com a proposta deste trabalho, que é a utilização destes para a resiliência da rede elétrica, através de serviços ancilares.

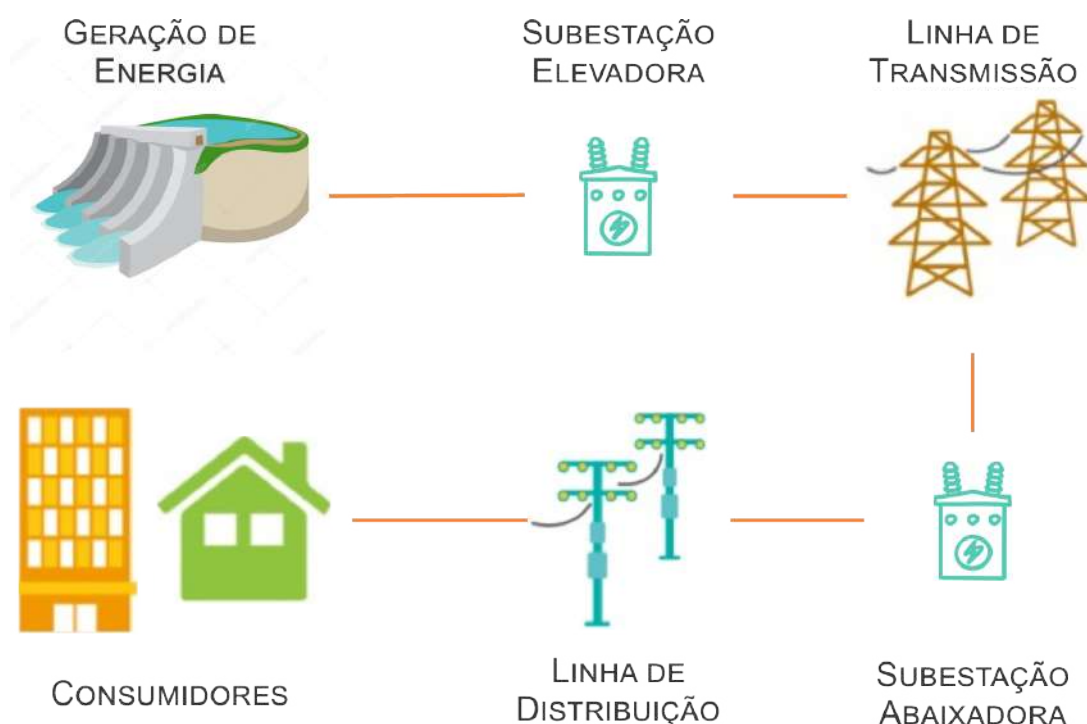
3 *SMART GRIDS*: FUNDAMENTOS E DESAFIOS DA REDE INTELIGENTE

A rede elétrica tradicional é construída de forma a levar energia dos geradores para os consumidores. Até hoje, esse formato atendeu às necessidades de abastecimento elétrico da sociedade. Contudo, o avanço da tecnologia trouxe formas novas de geração, armazenamento, gerenciamento e aplicações da eletricidade. O conceito de *smart grid* foi então criado e vem sendo aprimorado para atender novas exigências da sociedade moderna. Este capítulo visa apresentar o propósito da *smart grid*, sua aplicação e formas de geração de energia renovável que poderão ser utilizadas e beneficiadas com esta nova configuração de rede. Os conceitos da *smart grid* serão apresentados e relacionados ao uso em ambientes de *data center*.

3.1 Conceito

O conceito tradicional de rede elétrica foi desenvolvido para levar energia dos geradores aos consumidores de energia elétrica. Esse conceito, demonstrado na década de 1880 por Georje Westinghouse e William Stanley, previa fontes de geração de energia alternada em grande escala e instalada de forma centralizada, transmissão da energia gerada por longas distâncias e a distribuição de energia para o consumo por indústrias e centros urbanos (SAFIUDDIN, 2013). Desta forma, a energia seria levada de forma unidirecional e a tecnologia utilizada seria a presente na época, eletromecânica e sem sensoramento. A Figura 10 apresenta a configuração da rede de energia convencional comum no Brasil, em que a geração de energia é proveniente de uma fonte hidrelétrica de larga escala e distante dos centros consumidores, então transmitida em longas distâncias através de linhas de transmissão de alta tensão e posteriormente distribuída ao consumidor em tensão média e baixa pelas concessionárias.

Figura 10 – Arquitetura típica de uma rede de energia elétrica tradicional.



REDE ELÉTRICA

Fonte: Elaboração Própria (2020).

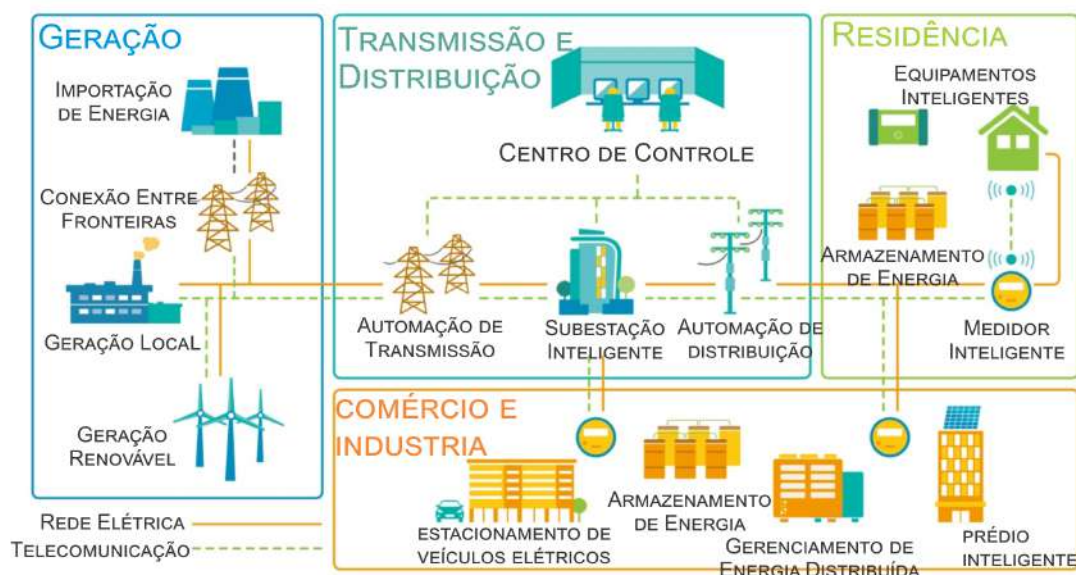
A *smart grid* é desenvolvida então como a próxima geração de rede elétrica, para atender as necessidades que surgiram com o avanço da tecnologia que não poderiam ser atendidas pela rede tradicional. Utilizando tecnologia da informação e rede de comunicação, a *smart grid* visa ser capaz de entregar energia de forma mais eficiente e segura e responder a um vasto universo de eventos e condições (FANG et al., 2012). Esta nova rede deverá estar preparada para geração distribuída de energia, requisito que vem surgindo da popularização de fontes renováveis de energia solar e eólica conectadas em tensão de distribuição. Além disso, abrangerá estratégias de armazenamento de energia, proteção e auto correção automáticas, para melhorar a resiliência da rede e a qualidade do serviço de distribuição de energia. Ainda, deverá trazer mais flexibilidade aos consumidores no mercado de energia elétrica, trazendo melhor monitoramento e alternativas de aquisição de energia para o consumidor comum, que hoje é cativo de concessionárias de distribuidores de energia. Na Tabela 2, é possível verificar um comparativo entre a rede tradicional e a rede inteligente, com suas principais diferenças.

Tabela 2 – Comparação entre rede tradicional e *smart grid*

Rede tradicional	<i>Smart Grid</i>
Eletromecânica	Eletrônica
Comunicação unidirecional	Comunicação bidirecional
Geração centralizada	Geração distribuída
Pouco sensoriamento	Totalmente sensoreada
Monitoramento manual	Auto monitoramento
Restauração manual	Restauração automática
Falhas e quedas de energia	Adaptativa e microrrede
Controle limitado	Controle abrangente
Poucas alternativas para o consumidor	Várias alternativas para o consumidor

Fonte: Adaptado de Fang et al. (2012).

A abrangência e interconectividade de uma rede *smart grid* é exemplificada na Figura 11. Na figura, é possível verificar que a geração centralizada e transmissão de energia ainda possuem importância, mas novas fontes de geração distribuída são inseridas em tensão de distribuição. Também é possível observar que o gerenciamento da rede é realizado devido a interconexão de comunicação entre medidores distribuídos em residências, comércios e indústrias e novos elementos, como o armazenamento de energia, são previstos para a manutenção da resiliência da rede elétrica.

Figura 11 – Esquemático da arquitetura da *smart grid*.

Fonte: Adaptado de CLP Power Hong Kong Limited (2016)

Com estas características, a *smart grid* vem para mudar a rede tradicional, respondendo a anseios ambientais com a inserção de fontes renováveis, melhorando a estabilidade e qualidade da rede e aumentando as alternativas de mercado de

energia. Todos estes avanços vêm ao encontro das necessidades de *data centers* e é natural que estes ambientes se beneficiem da evolução do fornecimento de energia para aumentar a qualidade de seus serviços. Contudo, os impactos de cargas de *data center*, de missão crítica, alta densidade energética e bastante representativas no consumo, devem ser avaliados e novas formas de apoio à *smart grid* devem ser estudadas e desenvolvidas.

3.2 Aplicação

O paradigma da *smart grid* foi criado com o objetivo de modernizar a rede elétrica em relação a qualidade do serviço prestado, incluir novas formas de geração distribuída e comercialização da energia elétrica. Para tornar estes requisitos viáveis, a *smart grid* utiliza avanços da tecnologia que ajudam a operação e manutenção da rede. Tanto da perspectiva de transporte de energia quanto da medição e monitoramento, a *smart grid* utiliza o avanço da tecnologia digital e de informações para tornar realidade os requisitos necessários para a nova rede elétrica.

Para isso, [Fang et al. \(2012\)](#) divide a *smart grid* em três sistemas distintos e interconectados, que dão suporte a nova rede. Estes são o sistema de infraestrutura inteligente, o sistema de gerenciamento inteligente e o sistema de proteção inteligente. A seguir, os sistemas serão aprofundados e será comentado como estes já são aplicados em *data centers*, que costumam ser implantados utilizando a vanguarda da tecnologia à disposição.

3.2.1 Sistema de infraestrutura inteligente

Caracterizado pelo fluxo bidirecional de energia e informação que dão suporte à operação da *smart grid*, o sistema de infraestrutura inteligente pode ser dividido em:

3.2.1.1 Subsistema de infraestrutura de energia

O subsistema de infraestrutura de energia na rede inteligente deverá ser capaz de absorver geração tradicional de energia, em grande escala e longe dos centros de consumo, bem como geração distribuída de energia, em pequena escala e instalada juntos aos centros de consumo, geralmente provinda de fontes renováveis. Estes novos tipos de geração de fontes renováveis possuem características distintas das gerações tradicionais a base de termo ou hidrelétricas. Fontes como solar e eólica não possuem armazenamento de energia primária, e por isso são operadas hoje de forma a maximizar sua geração. Isto é possível em um contexto de baixa inserção de

fontes estocásticas, pois a estabilidade da rede é garantida pela parcela convencional de geração, que hoje é proporcionalmente maior. Como podem possuir grande flutuação na entrada de energia primária e não possuem inércia de geração, fontes renováveis de energia, quando necessitam contribuir na resiliência da rede, precisam utilizar de artifícios para prover este tipo de estabilidade, como armazenadores de energia elétrica (baterias ou *flywheels*¹).

Como estas fontes de energia são instaladas nas áreas de distribuição de energia elétrica, a rede deverá se preparar para fluxo bidirecional de energia, com períodos de consumo e períodos de geração, o que aumenta a complexidade do controle do fluxo de potência. Com isso, áreas de consumidores com geração distribuída, em situações especiais de regulação de tensão e proteção, poderiam operar desconectadas da rede, ou em microrrede. Este é um conceito inerente da *smart grid* que será aprofundado na [seção 3.3](#). *Data Centers* já são projetados para poderem trabalhar isolados da rede de energia elétrica, em caso de falta de energia ou situações economicamente propícias, como pico de demanda. Contudo, não é um requisito para o projeto de *data centers* que estes suportem bidirecionalidade de energia (entregar energia a concessionária). Para que isso ocorra, os principais elementos elétricos deverão estar preparados, como transformador de entrada, chave de transferência e UPS.

3.2.1.2 Subsistema de infraestrutura de informação

A infraestrutura de informação é importante para o funcionamento de redes inteligentes para suportar a geração, integração, análise e otimização da informação proveniente dos diferentes elementos que a compõe. Esta informação é proveniente de equipamentos de ponta, como os medidores inteligentes, sensores e unidades de medição fasorial e é gerenciada por sistemas supervisórios, de integração e otimização ([FANG et al., 2012](#)).

Dentre os equipamentos de ponta, os medidores inteligentes são responsáveis por trazerem grandezas elétricas de dispositivos de consumidores, além de poderem atuar desligando equipamentos da rede. Estes medidores possuem função de monitoramento de consumo e potência que podem ser utilizados em centrais de gerenciamento para o cálculo da fatura de eletricidade. Além dos medidores, sensores inteligentes são dispostos na rede para detectarem falhas em condutores, pontos de calor e condições extremas de operação, provendo estas informações para melhoria da resiliência da rede.

Toda a informação obtida dos inúmeros elementos da rede deverá ser

¹ Dispositivo mecânico projetado para armazenar energia cinética.

concentrada por sistemas de gerenciamento. Estes sistemas deverão atuar para a identificação e mitigação de problemas na rede, assim como prever cenários de otimização e prevenção de falhas, além de servir de base para o mercado de comercialização de energia e serviços ancilares.

No caso de *data centers*, sistemas de gerenciamento de energia e outras grandezas são sugeridos para melhorar o controle e eficiência dos ambientes, por normas como a [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#). Estes sistemas, os DCIM, coletam informações de medidores de energia espalhados pela planta, para informar em tempo real métricas de eficiência próprias de *data center*, como o PUE e o DCIE. *Data centers* com alto nível de disponibilidade são implantados com medidores inteligentes de entrada de energia, para as cargas críticas e para os sistemas auxiliares. Estes medidores provêm métricas que são consolidadas pelos DCIM para a geração de relatórios e alertas. Além disso, outros sistemas já podem ser adquiridos com a capacidade de fornecer medições ao DCIM, são o caso das chaves de transferências, UPS, geradores, refrigeração e ativos como computadores e equipamentos de rede, tornando a capacidade de monitoramento dos sistemas de supervisão cada vez mais densa e próxima à ponta.

3.2.2 Sistema de gerenciamento inteligente

O sistema de gerenciamento inteligente deverá ser responsável por concentrar a informação proveniente de diversos dispositivos da rede elétrica e, através de sua análise, prover informações importantes para melhorar a eficiência, redução de custos de operação, equilíbrio entre consumo e demanda, entre outros. Estes sistemas poderão ter diferentes escalas e lidar com diferentes tipos de dados. Neste contexto, sistemas de gerenciamento da *smart grid* deverão ser capazes de padronizar os dados de análise e traçar objetivos e condutas de forma a aumentar a resiliência da rede e sua eficiência.

Dentre os objetivos do sistema de gerenciamento, o equilíbrio entre demanda e consumo se tornará cada vez mais complexo. Pelo fato da *smart grid* suportar fluxo de energia bidirecional e fontes alternativas de geração, o controle de fluxo de potência destes sistemas e formas de distribuir o perfil de consumo de cargas ao longo do tempo deverá ser gerenciado por sistemas inteligentes que darão suporte a tomada de decisão dos operadores.

Além disso, com base em informações históricas, os sistemas serão capazes de identificar pontos de falha na rede e auto resolver problemas através de dispositivos de atuação. Essa análise se torna possível pelo alto monitoramento de diferentes elementos da rede necessários para torná-la inteligente.

Como já dito, em sistemas elétricos de *data centers*, sistemas de gerenciamento já são desenvolvidos e implantados para suporte da operação, maximização da eficiência e mitigação de falhas. Os DCIM trabalham hoje com diferentes dispositivos de medição e atuação e são responsáveis por identificar falhas e analisar dados históricos da rede elétrica interna ao *data center* para que operadores tomem decisões quanto a mitigação de falhas e melhoria da eficiência energética.

3.2.3 Sistema de proteção inteligente

O sistema de proteção para *smart grid* deverá não somente prever problemas da rede elétrica como erros de operadores, falhas de equipamentos e desastres naturais como proteger a rede de ataques cibernéticos (FANG et al., 2012). A *smart grid* traz novos desafios com relação a proteção devido ao complexo fluxo de potência, característica intermitente das fontes renováveis, novos equipamentos eletrônicos auxiliares, grande volume de dados gerenciados, entre outros. Todos estes trazem novos pontos de falha à rede elétrica que, a medida que se torna mais complexa, necessita de novas maneiras de proteção para manter a confiabilidade da energia oferecida.

Apesar das novas inseguranças que a rede inteligente proporciona devido ao aumento de sua complexidade, a rede também suportará novas tecnologias que contribuem para sua resiliência, como alto nível de gerenciamento que será benéfico para a correção de anomalias com maior agilidade, novas tecnologias de suporte como armazenadores de energia, e novas configurações da carga como a microrrede. Os avanços dos equipamentos de proteção também proporcionam habilidades como a detecção de falhas e a atuação para a mitigação de forma automática, como isolamento dos pontos de falhas, ilhamento e chaveamento entre redes de distribuição diferentes sem a intervenção de operadores.

Nos *data centers*, muitas estratégias de proteção já são implantadas e condizentes com a proposta da *smart grid*. *Data centers* são construídos com equipamentos capazes de detectar a falta de energia, manter os equipamentos ligados e automaticamente escolher a configuração ilhada para operação sem consequências às cargas críticas, mantendo a disponibilidade dos serviços.

3.3 Microrredes

Uma das evoluções da *smart grid* com relação à rede tradicional é o suporte à geração distribuída de energia. Este tipo de fonte, em menor escala que a geração tradicional, é concebido para produzir energia próximo aos polos

consumidores, reduzindo assim perdas na transmissão. As fontes de energia distribuída são comumente renováveis, como solar e eólica, mas também podem ser pequenas centrais hidrelétricas (PCH), geradores a combustível fóssil, micro turbinas à gás, células combustível e armazenadores de energia (banco de baterias). Para a inclusão dessas novas fontes em tensão de distribuição, a rede elétrica deverá estar preparada para fluxo de potência bidirecional, como previsto pela *smart grid*, e o seu controle se torna complexo. Uma boa forma de gerenciar a nova rede de distribuição, com alta penetração de geração de pequeno porte, é dividindo-a em grupos menores, ou microrredes, trazendo alternativas de operação destes conjuntos com a finalidade de aumentar sua disponibilidade (LASSETER, 2011).

Segundo Lasseter (2011), microrredes são sistemas de energia integrados que consistem em cargas e fontes de geração interconectadas que podem operar conectadas à rede elétrica central ou em modo isolado. Estes grupos de cargas e fontes deverão possuir pontos de acoplamento à rede bem definidos e sua principal característica é a capacidade de operar de forma isolada e dinâmica. Por causa desta característica, vantagens como operar com falta de fornecimento ou problemas na qualidade de energia fornecida fazem a disponibilidade destes sistemas serem maiores do que sistemas tradicionais. Para que isso seja possível, os componentes da microrrede devem ser inteligentes, ou seja, possuírem a habilidade de se comunicar e responder a eventos automaticamente, utilizando informação local, como tensão, corrente e frequência. Identificando problemas na rede principal, o controle local deverá alternar o modo de operação para ilhado e, dessa forma, o controle de tensão e frequência da rede deverá ser delegado a microrrede, além do equilíbrio entre geração e demanda.

Em *data centers* que visam maior disponibilidade (com geração reserva), a capacidade de desconexão da rede de energia (macrorrede) já é possível. Em um nível simples, pode-se argumentar que *data centers* constituem uma microrrede, mas poucos *data centers* podem ativamente trocar entre fontes de energia e gerenciar cargas como a microrrede faz (LAWRENCE; ASCIERTO, 2019). Para que isso ocorra, a utilização de um controle via *software* deve ser empregado, e políticas devem ser definidas para a operação entre fontes de energia diferentes (tradicionais como os geradores a combustível fóssil ou geradores com fontes renováveis) e o controle da dinâmica da carga, tanto crítica como de refrigeração e auxiliar. Segundo Lawrence e Ascierto (2019), existem aplicações em que grandes cargas de *data centers* podem ajudar a suavizar demandas irregulares de forma a justificar o investimento na tecnologia de microrrede.

É possível constatar, dessa forma, que a configuração em microrredes traz benefícios a cargas especiais como as de *data centers*. Essa configuração, visando

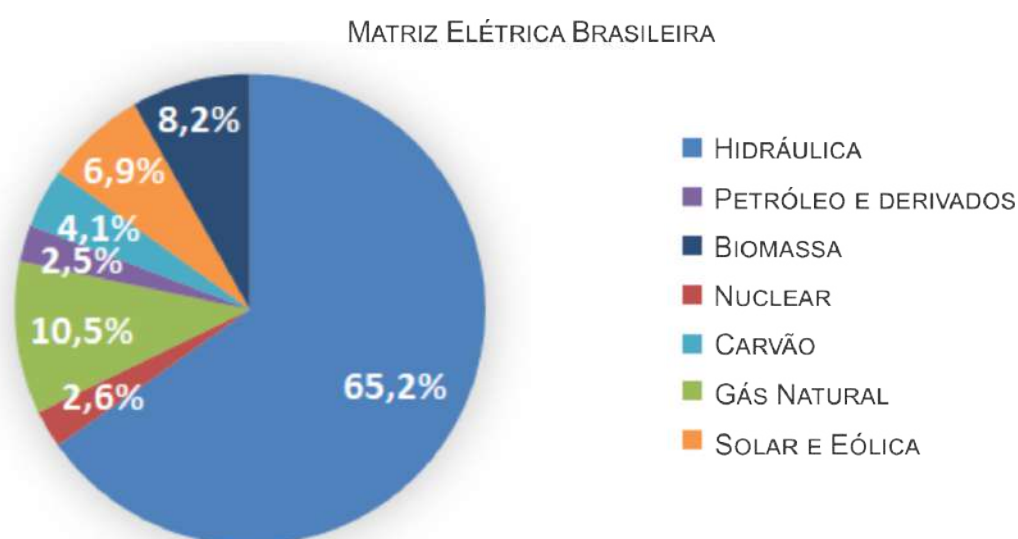
o aumento da disponibilidade, tem grande aderência a esse tipo de ambiente, que é avaliado principalmente por esse fator. A operação de *data centers* em microrredes em conjunto com fontes renováveis de energia traz grandes vantagens quanto a diminuição do consumo de energia pela rede principal e consequentemente a diminuição do custo de operação e aumento de performance. Novos desafios, contudo, são criados no sentido de gerenciamento de controle da frequência e tensão, transferência de cargas e sincronização com a macrorrede de forma a não afetar a disponibilidade e diminuir o risco de paradas.

3.4 Fontes renováveis de energia

As fontes renováveis de energia são aquelas que utilizam, como energia primária, fontes consideradas inesgotáveis para os padrões humanos de utilização. Exemplos dessas fontes são a energia solar, energia potencial da água, energia eólica, energia geotérmica e biomassa (VILLALVA, 2015). Estas fontes de energia podem ser adotadas em grande ou pequena escala, a sua forma de conexão com a rede elétrica dependerá do seu porte, distância do centro consumidor e conexão disponível.

No Brasil, a matriz de geração de energia é em sua grande parte renovável, devido ao alto potencial de energia hidrelétrica que o país possui. Na Figura 12, é possível verificar que mais de 80% da energia elétrica produzida no Brasil é gerada através de fontes renováveis de energia. Contudo, grande parte dessa energia é gerada em usinas hidrelétricas de grande porte.

Figura 12 – Participação por tipo de fonte na matriz elétrica brasileira.

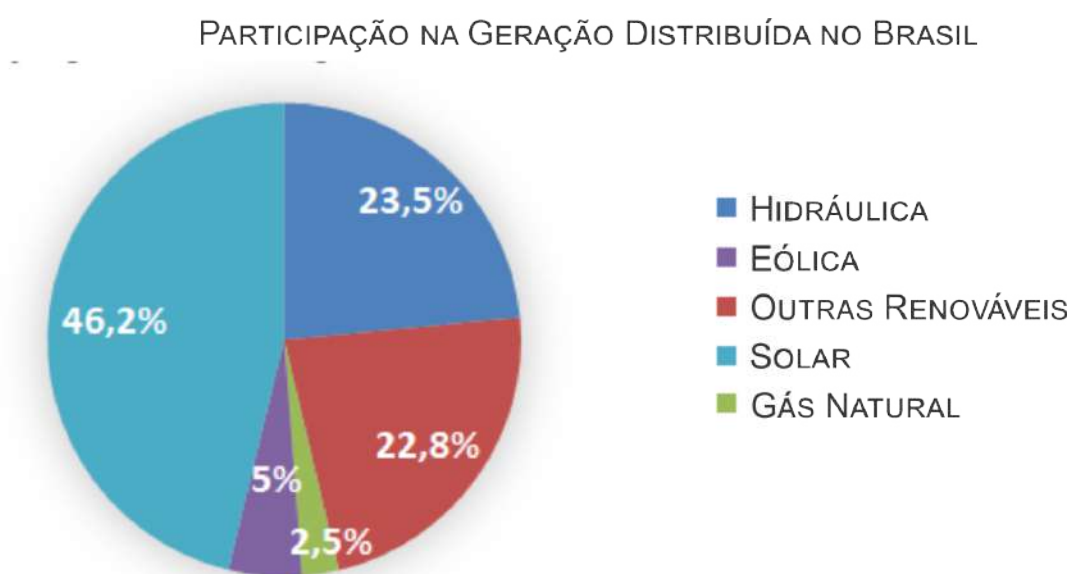


Fonte: Adaptado de [Energética \(2018\)](#).

A mini e microgeração distribuída ainda representam uma pequena parcela

da energia consumida no país. Estas fontes geradoras, que vêm apresentando grande taxa de crescimento na sua instalação, são caracterizadas quando utilizam fontes renováveis de energia ou geração qualificada, sendo microgeração aquelas que possuem potência instalada menor que 75 kW e como minigeração quando a potência instalada é superior a 75 kW e inferior a 3 MW para fonte hídrica ou 5 MW para as demais fontes. Em 2017, esse tipo de geração produziu 359 GWh de energia, um aumento de 245% em relação a 2016 ([ENERGÉTICA, 2018](#)). Na [Figura 13](#), é possível verificar a porcentagem de participação de cada tipo de geração de pequeno porte em 2017.

Figura 13 – Participação de cada fonte na geração distribuída em 2017.



Fonte: Adaptado de [Energética \(2018\)](#).

Com alta expectativa de crescimento, estas fontes já são inseridas em *data centers* pelo mundo. Grandes empresas provedoras de serviços de *data center* já apresentam preocupação com a origem da energia utilizada em seus sistemas e os impactos que esta energia proporciona ao meio ambiente. Por causa disso, o Google possui um programa para compra de energia renovável proporcional a toda energia gasta em seus *data centers* ([GOOGLE, 2020](#)). A Amazon também firmou um compromisso de transformar seus *data centers* ecológicos, e além da aquisição de energia de geradores através de fontes renováveis, também instalaram fazendas de geração solar e eólica próximos aos seus *data centers*, que gerarão 297 MW de energia ([AMAZON, 2020](#)). A Microsoft já é considerada neutra na emissão de carbono² desde 2012 e está no caminho para alimentar seus *data centers* com energia totalmente

² Emissão líquida de dióxido de carbono igual a 0, equilibrando as emissões de carbono com iniciativas de remoção de carbono (geralmente por meio de compensação).

renovável (MICROSOFT, 2019). As fontes de energia renovável mais promissoras para *data centers* serão detalhadas no [Apêndice A](#).

3.5 Conclusão

Neste capítulo, o conceito de *smart grid* foi apresentado e discutido como este se difere da rede elétrica convencional. A rede elétrica convencional foi implantada com base em grandes gerações, instaladas longe dos centros consumidores devido ao seu porte. Por esse motivo, grandes distâncias de transmissão precisam ser instaladas para levar a energia gerada até os centros consumidores. Além disso, a geração e o consumo precisam estar sempre equilibrados para a resiliência da rede, e para isso a rede convencional se suporta na inércia dos seus geradores mecânicos e na reserva de energia primária que pode ser convertida de forma controlada, de acordo com a demanda. A *smart grid*, por sua vez, vem atender a evolução da tecnologia de geração, que hoje está migrando para fontes renováveis de energia, como solar e eólica, que não possuem a característica de inércia de geração e são instaladas perto dos centros consumidores. Por este motivo, novas formas de controle do equilíbrio da rede são desenvolvidas.

A *smart grid* então foi apresentada em sua aplicação e ferramentas. Foram apresentadas as estruturas que compõem a nova rede inteligente e suas características. Estas são a infraestrutura de energia elétrica que contempla fontes renováveis instaladas nas redes de distribuição e fluxo bidirecional de energia além de instalação de armazenamento de energia na forma de baterias, para a sustentação do equilíbrio geração e demandada. A infraestrutura de informação da *smart grid* também é discutida, como forma da nova rede controlar o fluxo de energia, que é mais complexo, e adicionar nova visibilidade ao controle da rede e aos consumidores com relação ao mercado de energia. O gerenciamento da rede inteligente, que tem como objetivo de coletar informações disponibilizadas pela *smart grid*, foi comentado e seus avanços analisados, como análise de informações históricas para melhoria da rede. Além destes, a *smart grid* também necessita de uma nova estrutura de proteção, que devido às novas tecnologias empregadas, poderá ser automático e adaptativo, trazendo novas formas de operação da rede elétrica.

Do aumento da complexidade da rede elétrica com a inserção de fontes renováveis, uma nova configuração de rede é proposta para proteção e aumento da disponibilidade. Esta forma de gerenciamento da rede, subdividindo-a em grupos menores, chamados de microrredes, traz alternativas para operação da *smart grid*. O conceito de microrredes foi então apresentado e comentado com relação a *data centers*, que devido sua necessidade de alta disponibilidade, já possuem implementações desse

tipo para a manutenção da operação mesmo com a rede elétrica indisponível.

Por fim, as fontes renováveis de energia, que estão em crescimento de representatividade no Brasil e no mundo e são um dos desafios que a *smart grid* se propõe a resolver, foram apresentadas. No Brasil, a composição dos tipos de geração possui grande representação das usinas de geração hidráulica de grande porte, mas gerações menores de fontes renováveis, como a solar e eólica apresentaram grande crescimento percentual nos últimos anos. Destaca-se, para estes tipos de geração, o método de busca da máxima transferência de energia, visto que a energia primária nestes casos não pode ser acumulada. Desta forma, estas gerações não contribuem para a resiliência da rede, e o equilíbrio entre geração e demanda se transforma um desafio, objetivo deste estudo. O estudo de caso realizado nesse trabalho não tratará da inserção de fontes renováveis em ambientes de *data center*. O objetivo da apresentação desses novos tipos de geração, intermitentes e estocásticas, é apresentar uma motivação para a aderência de ambientes de missão crítica, especialmente *data centers*, no fornecimento de serviços para auxílio da resiliência da rede elétrica.

4 DATA CENTER E SMART GRID: POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DA OPERAÇÃO DE DATA CENTERS COMO PARTE DA SMART GRID

Dentro das novas possibilidades e desafios que a *smart grid* proporciona, a operação de *data centers* deverá mudar para se adequar às necessidades da nova rede elétrica. Dessa forma, este capítulo é dedicado a apresentar maneiras que o *data center* poderá beneficiar a resiliência da rede inteligente, e por consequência aumentar sua disponibilidade, que depende fortemente dessa característica da distribuição.

Na rede elétrica convencional, a geração de energia deve ser compatível com a demanda elétrica a todo tempo para que o sistema elétrico se mantenha estável. Quando existir um desequilíbrio entre a fonte de energia e os consumidores, a geração se ajusta para atender a flutuação da demanda e prover estabilidade. Isso é possível porque a geração de energia na rede convencional é geralmente despachável, na forma de termelétricas e hidroelétricas, fornecida através de geradores síncronos, que possuem inércia de geração e reserva de energia primária.

Na *smart grid*, o cenário é diferente. Com alta penetração de fontes renováveis, como solar e eólica, que não possuem reserva de energia primária, novas maneiras de equilibrar a produção e consumo de energia são estudadas para prover a estabilidade da rede elétrica. Nesse contexto, cargas significantes como *data centers*, que possuem a disponibilidade de seus serviços altamente atrelada à disponibilidade de energia elétrica, podem ser fundamentais na manutenção da *smart grid*.

4.1 Potencialidades da Operação de Data Centers em Conjunto à Smart Grids

Como apresentado no [Capítulo 2](#), ambientes de missão crítica, os *data centers*, são sistemas multidisciplinares, avaliados por sua disponibilidade. Estes ambientes possuem características especiais para diminuir a possibilidade de parada de operação, e dentre os ofensores da disponibilidade, o mais importante é a indisponibilidade elétrica. Por esse motivo, quanto maior a disponibilidade desejada, mais complexa a infraestrutura elétrica do *data center* se torna, e mais artifícios são disponibilizados para mitigar a falta de energia, como geradores reservas e UPS.

Com a evolução da geração de energia através de fontes alternativas de energia, como solar e eólica, novos desafios à estabilidade da rede foram criados. Com o objetivo de adaptar a rede elétrica a este novo contexto, o conceito de *smart grid* foi desenvolvido. Este novo conceito, apresentado no [Capítulo 3](#), prevê a necessidade de adequação a características novas trazidas pela geração através de fontes intermitentes, que são usualmente estocásticas e não despacháveis, e traz novas ferramentas para

lidar com a resiliência da rede.

A operação do sistema de energia elétrica clássico é unidirecional e orientado da geração para o consumo (PALENSKY; DIETRICH, 2011). Para que a rede seja estável, a geração e demanda de energia deve se manter equilibrada a todo tempo. Para que isso aconteça na rede elétrica convencional, a geração é constantemente ajustada a demanda. Isso acontece porque, neste modelo, o operador do sistema elétrico só pode controlar a geração, que por ser feita através de formas convencionais, como geradores síncronos termo e hidroelétricos, possuem liberdade de aumento ou diminuição de potência injetada na rede. Neste tipo de geração, é possível controlar a injeção de energia primária, mantendo-a armazenada quando não utilizada. Fontes alternativas de energia como solar e eólica operam de forma diferente. Estas fontes são controladas para obter sempre a máxima potência extraível da fonte primária de energia, e por isso, diminuem a liberdade do operador do sistema para o equilíbrio da rede. Além disso, a geração solar é realizada eletronicamente, e não possui a inércia de geração das máquinas síncronas para suprir energia em transitórios de demanda. A geração eólica, por sua vez, pode ser feita através de geradores síncronos e assíncronos, mas para que seja extraída a máxima potência de geração, precisa que a velocidade do gerador seja variável, e por isso os aerogeradores modernos possuem sua energia eletronicamente processada (inteira ou parcialmente) para se adequar a frequência da rede e buscar o máxima transferência de potência entre a fonte primária e elétrica. Dessa forma, também não contribuem à inércia da rede elétrica como geradores convencionais, que é essencial para manter a estabilidade da rede.

Neste sentido, apresenta-se a seguir possibilidades em que *data centers* poderão auxiliar a *smart grid* no controle do equilíbrio geração demanda. Através dos seus subsistemas de auxílio a disponibilidade, identifica-se oportunidades em que estes ambientes poderão alterar sua operação, fazendo com que a *smart grid* ganhe liberdade para manter sua resiliência.

4.1.1 Serviços Ancilares

Com novos problemas, a *smart grid* também traz novas soluções. Com característica de bidirecionalidade de fluxo de potência e maior visibilidade da demanda através de automação e monitoramento, o equilíbrio entre geração e demanda na *smart grid* ganha novas perspectivas. Apesar da diminuição do grau de liberdade na geração com fontes alternativas, a rede inteligente fornece maior grau de liberdade no gerenciamento de demanda, e cargas inteligentes podem prover serviços de estabilidade de rede.

Estes serviços, conhecidos como serviços ancilares, são responsáveis por manter a estabilidade da rede. [Rebours et al. \(2007\)](#) traz as principais formas de serviços que podem ser fornecidos para a rede em diversos países do mundo. Estes são:

- **Controle de frequência:** A principal forma de controle de energia ativa gerada e consumida pela rede é o controle de frequência. Para isto, existem três níveis de controle. O controle primário de frequência atua quando esta sofre variação. A variação negativa da frequência significa aumento de demanda, e automaticamente geradores aumentam a injeção de potência ativa na rede para contrabalancear a demanda e estabilizar a frequência. Da mesma forma, quando a frequência eleva significa que a demanda está menor que a geração, e geradores diminuem a inserção de potência ativa. Dessa forma, com alterações da demanda, geradores respondem para que a frequência volte a um patamar constante. O segundo nível de controle se dá de forma centralizada. Depois que a frequência é estabilizada, é necessário levá-la a frequência de rede alvo, que no Brasil é de 60 Hz. Para isso, o operador do sistema atua nos níveis de geração. O terceiro nível é feito atuando manualmente no despacho de unidades geradoras. Este é efetuado para restabelecer as reservas de controle primário e secundário de geração.
- **Controle da tensão:** O primeiro nível para o controle de tensão está relacionado ao controle de tensão da geração, e é empregado por controladores de tensão automáticos e compensadores de tensão estáticos. No segundo nível, é possível gerenciar, de forma centralizada, a injeção de potência reativa na rede pelos geradores. Por fim, existe um controle manual do fluxo de potência reativa na rede. Como a tensão e a potência reativa possuem forte relação no sistema de transmissão de energia, este controle requer que os dispositivos participantes tenham capacidade de gerar ou absorver energia reativa para a estabilização da tensão.

Do ponto de vista dos serviços ancilares fornecidos por agentes de geração, o [Operador Nacional do Sistema Elétrico \(2017c\)](#) traz os seguintes serviços para efeitos regulatórios:

- Controle primário de frequência;
- Controle secundário de frequência;
- Suporte de reativos;
- Autorrestabelecimento integral;

- Autorrestabelecimento parcial; e
- Sistemas Especiais de Proteção – SEP.

Da perspectiva da demanda de energia, serviços ancilares podem ser fornecidos de diferentes formas. Por estarem em áreas de consumo, este serviço disponibilizado por cargas se tornam cada vez mais atrativos, visto que o custo de implantação destes serviços pela demanda é menor do que a implantação de novas unidades geradoras (PALENSKY; DIETRICH, 2011). Segundo Palensky e Dietrich (2011), a demanda pode atuar fornecendo serviço ancilar de diferentes formas:

- alteração da dinâmica do consumo de energia;
- redução do consumo através de sinal;
- controle de frequência, que é tipicamente realizado por geradores mas podem ser efetuadas em cargas, que são consideradas reservas girantes virtuais ou "negativas".

Com as novas funcionalidades e ferramentas fornecidas pela *smart grid*, novas maneiras de fornecimento de serviços ancilares deverão ser regulamentados e desenvolvidos, como os serviços ancilares 4.0 (ZOTTI et al., 2018). Ambientes de *data center*, com suas particularidades em termos de infraestrutura elétrica, tornam-se candidatos a prover estes serviços e se beneficiam de uma rede elétrica mais confiável e disponível.

4.1.2 Controle de Demanda

A demanda de energia pelos consumidores deve ser provida pela geração e sistemas de armazenamento a todo o tempo. Na rede elétrica convencional, o controle do equilíbrio da rede é realizado do lado da geração. Com a *smart grid*, cargas com características especiais podem ser gerenciadas e agendadas com o intuito de auxiliar o equilíbrio entre geração e demanda. Neste aspecto, *data centers* se tornam excelentes candidatos. Ambientes de *data center* são altamente automatizados e monitorados, e as principais demandas de um *data center*, que são os equipamentos de TI e a refrigeração, possuem flexibilidade para ajuste (WIERMAN et al., 2014). O controle da demanda já é incentivado através de modalidades tarifárias especiais para diferentes tipos de consumidores, que será discutido na [subseção 4.2.3](#).

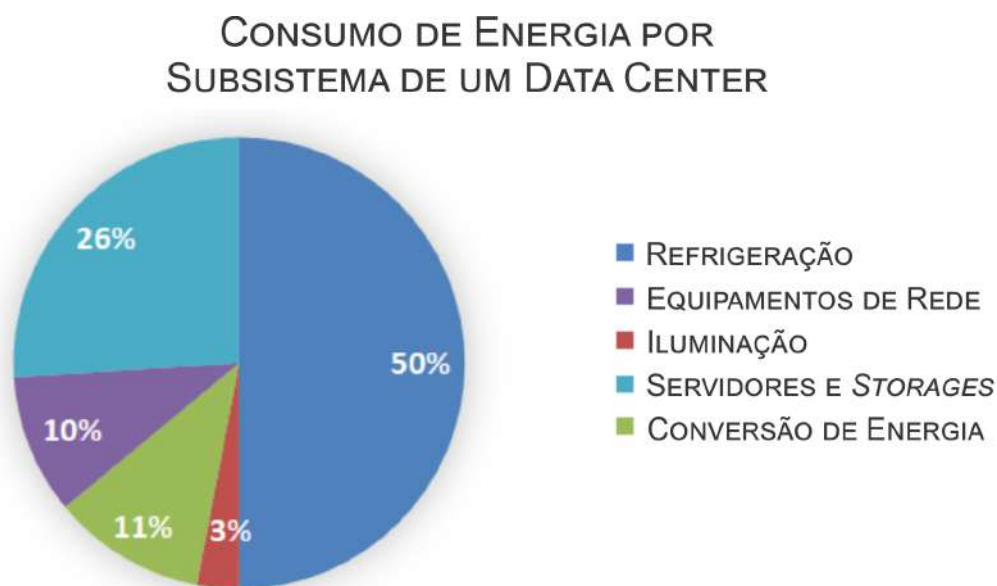
Além disso, a modulação da demanda traz vantagens ao dimensionamento das redes de distribuição e transmissão. Através da suavização do padrão de demanda ao longo do tempo, o mesmo dimensionamento de cabos elétricos pode atender um

maior número de consumidores, visto que estes devem ser projetados para o pico da demanda, que nesse caso terá característica mais uniforme, e fator de carga¹ elevado.

Quanto maior a disponibilidade requerida por um *data center*, mais complexa será sua infraestrutura elétrica. Esse tipo de investimento é justificado quanto maior for o custo de indisponibilidade que os serviços fornecidos pelo *data center* possuir. Esse investimento já previsto pode ser utilizado não só para a disponibilidade, mas para o fornecimento de serviços ancilares. Dessa forma, quando a remuneração de serviços ancilares realizados por cargas for regulamentada e um conjunto de *data centers* aderirem a estratégia, contribuindo com a disponibilidade do sistema elétrico, cada *data center* também se beneficiará com a estabilidade da rede.

A demanda de um *data center* é o somatório da energia consumida por seus subsistemas. Na Figura 14, pode-se verificar a média da distribuição do consumo de energia elétrica para cada área. É possível perceber que, em média, 36% da energia consumida pelo *data center* é despendida nos equipamentos de TI, que geram trabalho real. Os 64% restantes são dedicados ao suporte à disponibilidade, sendo que destes 50% é gasto na retirada do calor gerado pelos equipamentos de TI, pelo sistema de refrigeração.

Figura 14 – Consumo de energia por diferentes subsistemas de um *data center*.



Fonte: Adaptado de Dayarathna, Wen e Fan (2016) .

Dentre os equipamentos utilizados para a disponibilidade do *data center* e os sistemas de apoio, os seguintes podem contribuir para a modulação e controle da

¹ Razão entre a demanda média e a demanda máxima de uma carga, ocorridas no mesmo intervalo de tempo especificado.

energia consumida:

4.1.2.1 UPS e Baterias

Data centers que necessitam de disponibilidade igual ou maior que a classificação Tier II ([subseção 2.2.2](#)) precisam necessariamente possuir um sistema de geração reserva e um sistema de UPS para sustentar a carga crítica no período de transferência entre a distribuidora e a geração própria.

O sistema de UPS, como mostrado na [subseção 2.3.1](#), é composto de um conversor eletrônico de energia de tensão alternada para contínua, um conjunto de armazenadores de carga (mais comumente baterias) e um conversor de energia de tensão contínua para alternada. Este sistema, pela recomendação da [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#), deve sustentar a carga de equipamentos de TI por no mínimo 15 minutos.

Visto que estes ambientes críticos já possuem este investimento previsto, [Thompson et al. \(2016\)](#) apresenta uma metodologia para otimizar o investimento na capacidade de armazenamento de *data centers* com o objetivo de aumentar a disponibilidade e regular a demanda do sistema. Com a adição de mais energia armazenada, é possível deixar de consumir energia da rede em períodos em que a rede está sobrecarregada. Este tipo de armazenamento de energia pode responder rapidamente a alterações na rede, provendo confiabilidade em surtos, mas o tempo em que esta energia será utilizada dependerá do volume armazenado, com restrição da energia reservada para a disponibilidade do *data center* em uma transferência entre rede principal e geradores.

Para a sustentação da *smart grid*, formas de controle de redução de picos de demanda na rede de distribuição são desenvolvidas. [Rowe et al. \(2014\)](#) apresenta uma metodologia para diminuir a pico de demanda baseado em dados históricos e previsão de demanda. *Data centers* são aderentes a este tipo de controle visto que são ambientes altamente monitorados. [Aksanli \(2017\)](#) analisa a redução de pico por *data centers* levando em consideração diferentes tecnologias de baterias e baseado no modelo do *data center*, que pode possuir um único dono ou prover serviços para empresas diferentes, conhecido como *colocation*, em que é possível alugar servidores.

Para aumentar a eficiência e custo benefício da utilização de sistemas de UPS no controle de demanda, novas tecnologias de armazenamento de energia são desenvolvidas. No cenário atual, as baterias de chumbo-ácido são mais utilizadas, mas baterias de Lithium-Ion se tornam rapidamente mais comuns ([LAWRENCE; ASCIERTO, 2019](#)). Outras tecnologias são desenvolvidas, com a utilização de baterias híbridas com super capacitores, que possuem benefícios com relação aos ciclos de carga e

descarga rápidos necessários aos armazenadores quando empregados na modulação da demanda (ZHENG; MA; WANG, 2017).

4.1.2.2 Refrigeração

O subsistema de refrigeração é essencial aos *data centers*. Devido à alta densidade energética destes espaços e a natureza da carga crítica que é composta de equipamentos de TI, a retirada do calor gerado é um ponto chave para o funcionamento do ambiente. Apesar deste subsistema não gerar trabalho útil do *data center*, isto é, processamento de dados, a energia utilizada pela carga útil é quase por completo dissipada em forma de calor e, sem a refrigeração adequada, o *data center* perde eficiência e disponibilidade. Como apresentado na [subseção 2.3.4](#), existe um intervalo de temperatura e umidade recomendado para a operação do sistema.

Quanto maior a disponibilidade e eficiência desejada para o *data center*, mais tecnologia é empregada neste subsistema. *Data centers* com alta disponibilidade empregam em sua estrutura refrigeradores de precisão compostos por condicionadores de ar e resfriadores. Refrigeradores de precisão, diferentemente dos refrigeradores de conforto, são projetados para maior eficiência na retirada de calor sensível, maior nível de controle da temperatura e umidade, melhor distribuição do ar refrigerado e mais horas de operação (APC, 2001).

Para a operação do *data center*, a norma brasileira especifica os limites de temperatura e umidade, que deverão estar nos intervalos de 18º C e 27º C de temperatura e 30% a 60% de umidade relativa do ar (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Apesar de importantes para o funcionamento dos equipamento de TI, estes intervalos proporcionam margem para o controle da demanda de refrigeração e a dinâmica térmica do ambiente pode ser explorada para modulação do sistema como um todo.

Neste sentido, estudos sobre equipamentos de refrigeração e sua contribuição para ambientes de *smart grid* vêm sendo desenvolvidos visto o potencial de contribuição que estas cargas têm em relação a estabilidade da rede. Hassan et al. (2015) apresenta a efetividade de planos de consumidores no uso de equipamentos de controle de temperatura para a redução do pico de demanda em redes inteligentes. Neste trabalho, foram selecionados modelos de refrigeradores residenciais para a análise, mas a metodologia empregada pode, de maneira geral e com algumas ressalvas, ser empregada para ambientes de *data center*.

Com relação a cargas termostáticas, Tindemans, Trovato e Strbac (2015) mostra que cargas de refrigeração e aquecimento que possuem grau de variação podem prover serviços de controle de frequência da rede. O algoritmo apresentado

leva em consideração restrições como tempo de resposta, resiliência e temperatura. O controle apresentado explora o intervalo proveniente de equipamentos controlados por termostatos, mas, no caso de *data centers*, a banda explorada pode ser todo o intervalo sugerido pela norma ainda fornecendo qualidade na refrigeração dos dispositivos de TI.

Especificamente para *data centers*, a possibilidade de se armazenar energia em tanques de armazenamento de energia térmica foi explorada por [Zheng, Ma e Wang \(2014\)](#). Estes tanques são construídos para abastecer fluido refrigerante a condensadores quando necessário. No estudo desenvolvido, é apresentado que esta forma de armazenamento de energia, mais barata que baterias de UPS, pode contribuir na modulação de consumo de energia do *data center*, diminuindo o consumo de condensadores quando utilizados.

4.1.2.3 Equipamentos de TI

Os equipamentos de TI são considerados cargas críticas de um *data center* por proverem o trabalho útil do ambiente. Estes equipamentos são responsáveis pelo processamento, armazenamento e transferência de dados, que consistem nos serviços oferecidos pelo *data center*. É esta a parcela da carga que precisa estar sempre disponível, e seu desligamento pode trazer grandes prejuízos às corporações que utilizam seus serviços. Por este motivo que estruturas elétricas complexas são projetadas para suportar seu funcionamento, como apresentado na [seção 2.2](#).

Mesmo essenciais ao *data center*, os equipamentos de TI fornecem certo grau de deslocamento de carga para a modulação da demanda total do *data center*. A diminuição do consumo destes equipamentos pode trazer benefícios acumulados, visto que acarretam diminuição da demanda de refrigeração. Contudo, a restrição de acordo de nível de serviço (SLA - *Service Level Agreement*) deve ser respeitada para que não haja degradação dos serviços fornecidos. Ainda assim, aumento do tempo de resposta dos serviços fornecidos, ainda dentro dos limites necessários, dão liberdade para o gerenciamento da demanda do ambiente.

Algumas técnicas de deslocamento de consumo destes equipamentos são analisadas na literatura. [Li et al. \(2012\)](#) verifica como o dimensionamento da frequência e tensão dos servidores pode afetar o consumo de energia e propõe formas de gerenciamento da demanda com o objetivo de diminuir picos, tendo como restrição o SLA e a qualidade dos serviços prestados por *data centers* de internet. O modelo integra o gerenciamento de energia com regras de mercado para otimizar o custo de operação.

Outra maneira de deslocar a demanda de um *data center* é através do

deslocamento geográfico do processamento. Através de tecnologias como a virtualização de máquinas, é possível transferir processamento e armazenamento de dados entre *data centers* em diferentes lugares do mundo. [Nguyen et al. \(2013\)](#) estudou essa estratégia para acompanhar a geração de fontes renováveis em diferentes localidades. Sua proposta é deslocar a carga para onde existir geração solar e eólica disponível. Este método pode ser empregado também para a modulação de demanda, através de migração de serviços para áreas que não estão sob pico.

Uma parcela dos serviços realizados pelas cargas de TI pode ser agendada. Para a otimização dos custos de um *data center*, [Luo, Rao e Liu \(2014\)](#) propõe um algoritmo para otimizar o custo operacional de *data centers* através do agendamento dos serviços oferecidos com garantia do limite de tempo de resposta para qualidade dos serviços.

Várias são as possibilidades de modulação da demanda das cargas críticas do *data center*. Com isso, é possível verificar que mesmo a carga crítica possui liberdade de deslocamento, e *data centers* estão aptos a auxiliar a resiliência da rede através de seu consumo, facilitando assim a inserção de fontes renováveis na geração de energia elétrica.

4.1.3 Corte de carga

Em casos extremos de desequilíbrio de energia entre geradores e consumidores, o operador do sistema elétrico opta por cortar cargas. No Brasil, esta estratégia é empregada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) quando a frequência da rede permanece em 59,8 Hz por mais de 10 minutos ([OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2009](#)). As ações de gerenciamento de carga são o corte indireto de carga, pela redução intencional do nível de tensão, corte direto (manual ou automático) da carga e remanejamento de carga entre instalações da rede básica. Esta estratégia é essencial para manter a qualidade de suprimento e segurança da rede.

Esta necessidade da rede pode ser fornecida como serviço em ambientes de *data centers*. Estes ambientes, quando classificados como tier II ou superior, estão preparados para trabalharem de forma isolada e realizarem a transferência de suas cargas para fontes de geração próprias. Este cenário pode ser benéfico para a rede e para o *data center*, visto que a rede poderá mitigar problemas de ordem transitória e se restabelecer mais rapidamente e os *data centers* voltarão à operação integrada à rede de forma mais rápida.

Quando o corte de carga é programado e agendado, o *data center* poderá escolher se os geradores serão acionados ou não. *Data Centers* que possuem reserva

de bateria maiores para modulação da demanda poderão utilizar esta reserva para operarem de forma isolada da rede sem acionamento dos geradores reservas durante o período de tempo suportado pelas baterias, restringindo este tempo para manter uma reserva de energia que possibilite a sincronização dos geradores e transferência de carga, assegurando sua disponibilidade.

Além do funcionamento ilhado intencional, *data centers* podem oferecer cortes parciais de demanda, utilizando a inércia térmica intrínseca do seu sistema de refrigeração. A resposta de sistemas de refrigeração como suporte para a frequência da rede foi simulada por [Short, Infield e Freris \(2007\)](#). Em seu modelo, refrigeradores comerciais foram analisados, mas os resultados podem ser aplicados a sistema de refrigeração de *data centers*, que possuem um intervalo de temperatura e umidade de trabalho. Como resultado, verificou-se que alterações na geração são suavizadas pelo corte da refrigeração de forma mais eficiente que a utilização da reserva girante de geração.

É possível verificar, então, que cargas de *data centers* e a sua evolução nos critérios de disponibilidade podem proporcionar condições de suporte a rede elétrica, pelo viés da demanda, necessário para a inclusão de fontes renováveis de energia. O conceito de *smart grid* vem unir estas necessidades, de geração limpa e estabilidade de rede, provendo a tecnologia necessária para o monitoramento e controle do lado da demanda, oferecendo novas oportunidades de serviços ancilares.

4.1.4 Fornecimento de energia

Devido a necessidade de alta disponibilidade, *data centers* tier II ou superiores possuem em sua arquitetura formas de prover energia em períodos de falta. Os equipamentos utilizados para esta finalidade são os geradores a diesel reservas e os UPS. Geradores reservas são acionados quando detectada a ausência de fornecimento de energia pela concessionária. Durante o período em que são acionados, os UPS são responsáveis por prover energia, armazenada na forma de baterias ou *flywheels*, enquanto a transferência da carga é realizada pela chave de transferência.

Em momentos de fornecimento de energia normalizado, os geradores de energia não são utilizados. Durante o período de ociosidade, estes dispositivos possuem liberdade de fornecer energia para outras cargas ou mesmo para o sistema elétrico. Essa possibilidade, pouco explorada, traz vantagens como fornecimento de energia perto dos centros consumidores e mantém os geradores em operação e sincronizados caso haja necessidade de alimentar a carga crítica do *data center*, que será sempre prioridade. Este serviço, para ser viável, deve ser analisado sob a

perspectiva de remuneração na venda da energia e fornecimento de serviço ancilar e o custo do combustível necessário para geração. Além disso, aspectos ambientais sobre a utilização de combustíveis fósseis deve ser consideradas.

Outra possibilidade de fornecimento de energia é através do UPS. Em situações de surto de energia, de forma transitória, o fornecimento de energia através do sistema de UPS pode ser uma opção. Esta configuração é interessante no fornecimento de energia de forma rápida em curtos períodos de tempo, visto que a energia fornecida é aquela armazenada em baterias ou outros sistemas de armazenamento de energia de rápida descarga. Neste caso, o dimensionamento do armazenamento de energia deverá ser projetado para tal configuração e o sistema de conversão de energia de entrada do UPS deverá estar preparado para bidirecionalidade do fluxo de energia. Ao considerar esta possibilidade, além do custo de aquisição de armazenamento de energia, outras questões específicas da tecnologia utilizada devem ser levadas em consideração. Estes armazenadores possuem restrições e um custo com relação ao número de cargas e descargas que devem ser avaliados da perspectiva de custo-benefício do fornecimento deste serviço. Estas configurações e limitações serão discutidas na [seção 4.3](#).

4.1.5 Outros Serviços

Nas seções anteriores, foram apresentados os serviços ancilares e formas em que o *data center* pode contribuir para a estabilidade da rede, atuando no equilíbrio entre consumo de geração de energia. O problema de estabilidade da rede ganha novos desafios quando tratada a inclusão de fontes renováveis de energia e, por isso, é necessária que a rede encontre mecanismos de resiliência, através da *smart grid*.

Mas, além da estabilidade, a rede elétrica passa por desafios em relação a qualidade da energia fornecida. O aumento das cargas eletrônicas, já predominantes no cenário atual, traz consequência a qualidade da energia entregue a consumidores. Neste aspecto, também é possível investigar como *data centers* podem contribuir para a qualidade do serviço de distribuição, através de fornecimento de potência reativa, adequação do fator de potência, balanceamento de corrente entre fases e filtro de componentes harmônicas de corrente.

Por possuírem o sistema de UPS e armazenamento de energia, *data centers* podem prover serviços para a qualidade de energia, como regulação da amplitude de tensão, compensação de reativos e filtro ativo. Este tipo de compensação é analisado por [Triggianese, Liccardo e Marino \(2007\)](#) em um cenário de geradores eólicos com energia eletronicamente processada. Neste cenário, são considerados conversores de energia bidirecionais. Estes conversores, na maioria dos casos, adicionam valor quanto aumento da qualidade de energia, regulação de tensão, e

interface para armazenamento de energia. [Serban, Ordonez e Pondiche \(2017\)](#) demonstra novas estratégias de suporte a rede com relação a potência ativa e reativa, aplicado a conversores de energia com armazenamento em redes de distribuição.

Para a aplicação em *data centers*, algumas adaptações devem ser feitas. O sistema de UPS deverá estar preparado para o controle de fluxo de energia bidirecional, o que não acontece na maioria dos casos, mas possui grande potencial para suporte a rede inteligente. Esta nova configuração, para prestar suporte a rede, deverá ser estudada em termos de controle da energia injetada com restrição de manter energia suficiente para a manutenção do *data center*, além de questões de diminuição da eficiência do sistema de UPS como um todo, e suas consequências a eficiência do *data center*.

4.2 Regulamentação no Brasil

O setor elétrico, no Brasil, é regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Esta é responsável por regular a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, fiscalizar as concessões, permissões e os serviços de energia elétrica, estabelecer tarifas, entre outros ([AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019b](#)). Dentre as resoluções formatadas pela ANEEL estão as regras que regem a contratação de serviços ancilares, tarifação para controle da demanda e geração de energia, comentados a seguir.

4.2.1 Serviços ancilares

A ANEEL, através da Resolução ANEEL nº 265, de 10 de junho de 2003, estabeleceu os procedimentos para a prestação de serviços ancilares de geração e transmissão de energia elétrica no Brasil ([AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2003](#)). Nela, foram dispostos as diretrizes para contratação e remuneração de serviços ancilares, mas não são aplicadas à geração distribuída e às redes de distribuição. Através da Audiência Pública Nº 010/2006, o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE) apresentou uma análise que leva em consideração a aplicação da normatização à geração distribuída ([INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 2006](#)). Neste, é proposta a definição de serviço ancilar como serviços que complementam os serviços principais que, na segmentação brasileira, são caracterizados pela geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica.

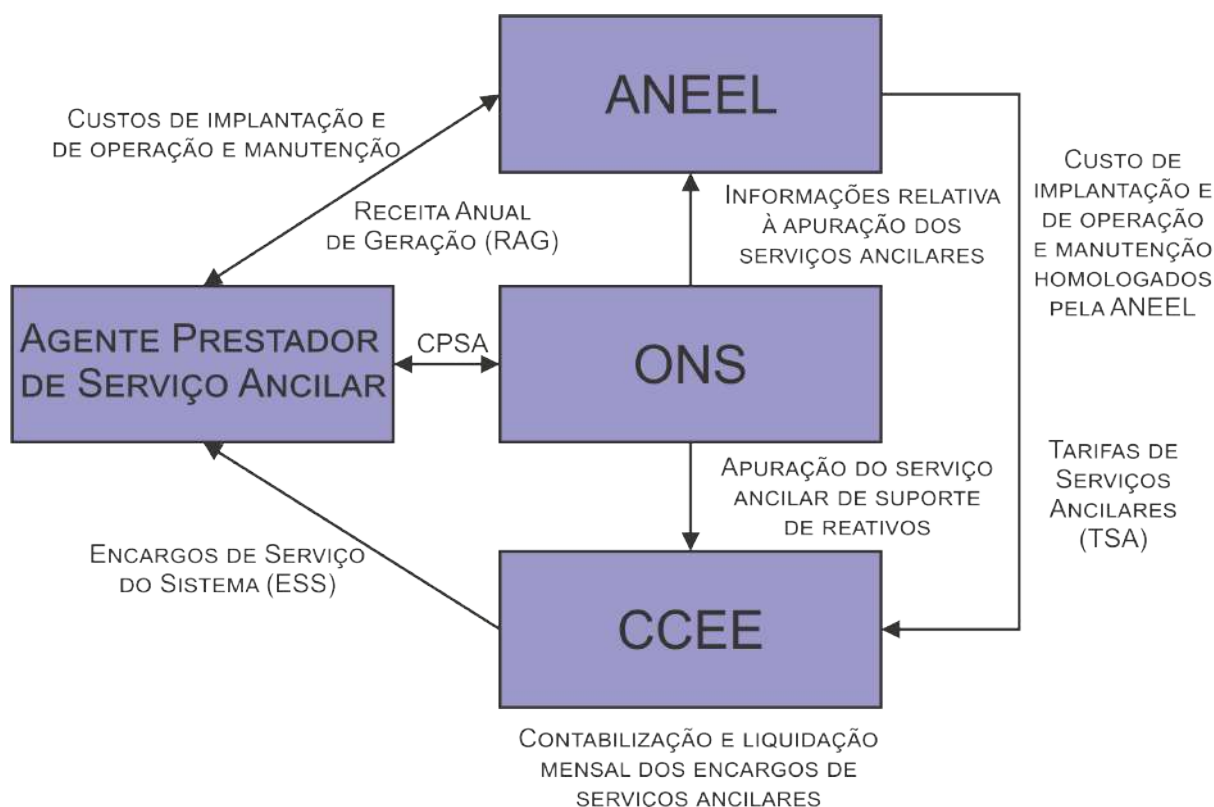
A ANEEL concedeu a administração dos serviços ancilares ao Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS). Através do procedimento de rede, o ONS apresenta

os critérios utilizados para os serviços ancilares, como arranjos comerciais e celebração dos Contratos de Prestação de Serviços Ancilares (CPSA). Neste módulo, os serviços ancilares que podem ser prestados são:

- a) Controle primário de frequência e reserva de potência primária. realizados pelas unidades geradoras integrantes do Sistema Interligado Nacional (SIN);
- b) Controle secundário de frequência e reserva de potência secundária, por usina participantes do Controle Automático de Geração (CAG);
- c) Suporte de reativos prestados por unidades geradoras;
- d) Auto restabelecimento das unidades geradoras;
- e) Sistema Especial de Proteção (SEP) ([OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2017b](#)).

A ONS é, então, responsável pela contratação dos serviços ancilares e deve estabelecer os critérios relativos aos arranjos comerciais prestados por agentes. Estes serviços são contabilizados e liquidados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e são remunerados aos agentes prestadores de serviço ancilar através dos encargos de serviço do sistema. O processo de administração deste serviço pode ser observado na [Figura 15](#), em que é possível verificar a interação entre os diferentes órgãos para que os serviços ancilares sejam dispostos para o SIN.

Figura 15 – Processo de administração dos serviços ancilares.



Fonte: Adaptado de [Operador Nacional do Sistema Elétrico \(2017a\)](#).

É possível verificar que a formatação dos serviços ancilares para a rede convencional já está consolidado na operação do sistema elétrico brasileiro. Não é previsto, no entanto, o fornecimento desse tipo de serviço por consumidores, e um *data center*, mesmo tendo geração própria, não se configura como um agente de geração, visto que a potência instalada é prevista para a carga do *data center* e que não é utilizado geração própria destes ambientes fora da configuração de ilhamento. Contudo, com o avanço da penetração de geração distribuída renovável, novas considerações na regulamentação deverão ser formuladas para prever o auxílio de cargas representativas e controláveis, como os *data centers* no suporte da nova rede. Um exemplo desta tendência é o *workshop* organizado pela ANEEL e pelo ONS para promover uma discussão de novas formas de serviços ancilares no Brasil. Este evento, que ocorreu em julho e agosto de 2019 tem o objetivo de reunir agentes e entidades setoriais, associações, universidades, entre outros participantes para debater e identificar novas oportunidades de prestação de serviço ancilar ([AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019a](#)).

4.2.2 Microrredes

Com relação aos serviços que podem ser oferecidos pelas microrredes, a regulamentação brasileira ainda se encontra em um estado incipiente sobre o tema. Mesmo o conceito de microrredes já tendo sido definido em [Agência Nacional de Energia Elétrica \(2018\)](#) como uma rede de distribuição de energia elétrica que pode operar isoladamente do sistema de distribuição atendida diretamente por uma unidade de geração, a regulamentação ainda provê dificuldades para a operação da mesma e o fornecimento de serviços ancilares.

Destes entraves, [Oliveira \(2017\)](#) apresenta os seguintes como passíveis de evolução:

- Classificação regulatória incompleta. O conceito de múltiplas unidades consumidoras é introduzido pela REN 687/2015 é o mais próximo do conceito de microrredes, mas diversos aspectos não são cobertos, como a possibilidade de prover serviços à rede, comercialização e ilhamento.
- Operação autônoma não permitida. Mesmo a possibilidade de operação ilhada de partes do sistema de distribuição ter sido prevista em [Agência Nacional de Energia Elétrica \(2017a\)](#), a condição de ilhamentos é vetada pelas concessionárias por motivos de segurança, proteção e qualidade de energia.
- Políticas de incentivo com relação a unidades consumidoras que possuam geração de energia por fonte renovável e não renovável de energia ainda não são definidas.
- Fornecimento de serviços ancilares por microrredes, como consumidores especiais, ainda não são definidos.
- Não é permitida a livre comercialização de excedentes da geração distribuída para consumidores locais dentro da microrrede.

Segundo ([ALI et al., 2017](#)), a União Europeia, os Estados Unidos da América e a China formularam várias políticas e regulamentações para prover diferentes incentivos e benefícios para a exploração e utilização de fontes de energia distribuídas e tecnologias de geração de energia por fontes renováveis, e instalação de microrredes. Apesar disso, ainda são encontrados desafios como as diferenças entre políticas nacionais de países vizinhos, barreiras econômicas como distorção nos preços dos subsídios e encargos entre fontes de energia renováveis e tradicionais e dificuldade de acesso aos investimentos.

4.2.3 Controle de Demanda

O controle de demanda, no Brasil, é realizado através da tarifação do consumo e demanda de energia elétrica, disposto na Resolução Normativa nº 414/2010 ([AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010](#)). Nesta resolução, são dispostas a estrutura tarifária e a classificação dos consumidores aptos a cada tipo de tarifação. Existem cinco modalidades de tarifação diferentes vigentes no Brasil, cada uma aplicável a diferentes tipos de consumidores.

Os consumidores são classificados em grupos. São estes:

Grupo A, caracterizado por fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV ou atendidos por sistema subterrâneo de tensão secundária, que estão submetidos ao tipo de tarifação binômia, subdivididos nos seguintes subgrupos:

- a) subgrupo A1 - tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- b) subgrupo A2 - tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- c) subgrupo A3 - tensão de fornecimento de 69 kV;
- d) subgrupo A3a - tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- e) subgrupo A4 - tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;
- f) subgrupo AS - tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

Grupo B, caracterizado pelas unidades consumidores com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, submetidos a tarifação monômia e submetidos nos seguintes grupos:

- a) subgrupo B1 - residencial;
- b) subgrupo B2 - rural;
- c) subgrupo B3 - demais classes;
- d) subgrupo B4 - iluminação pública.

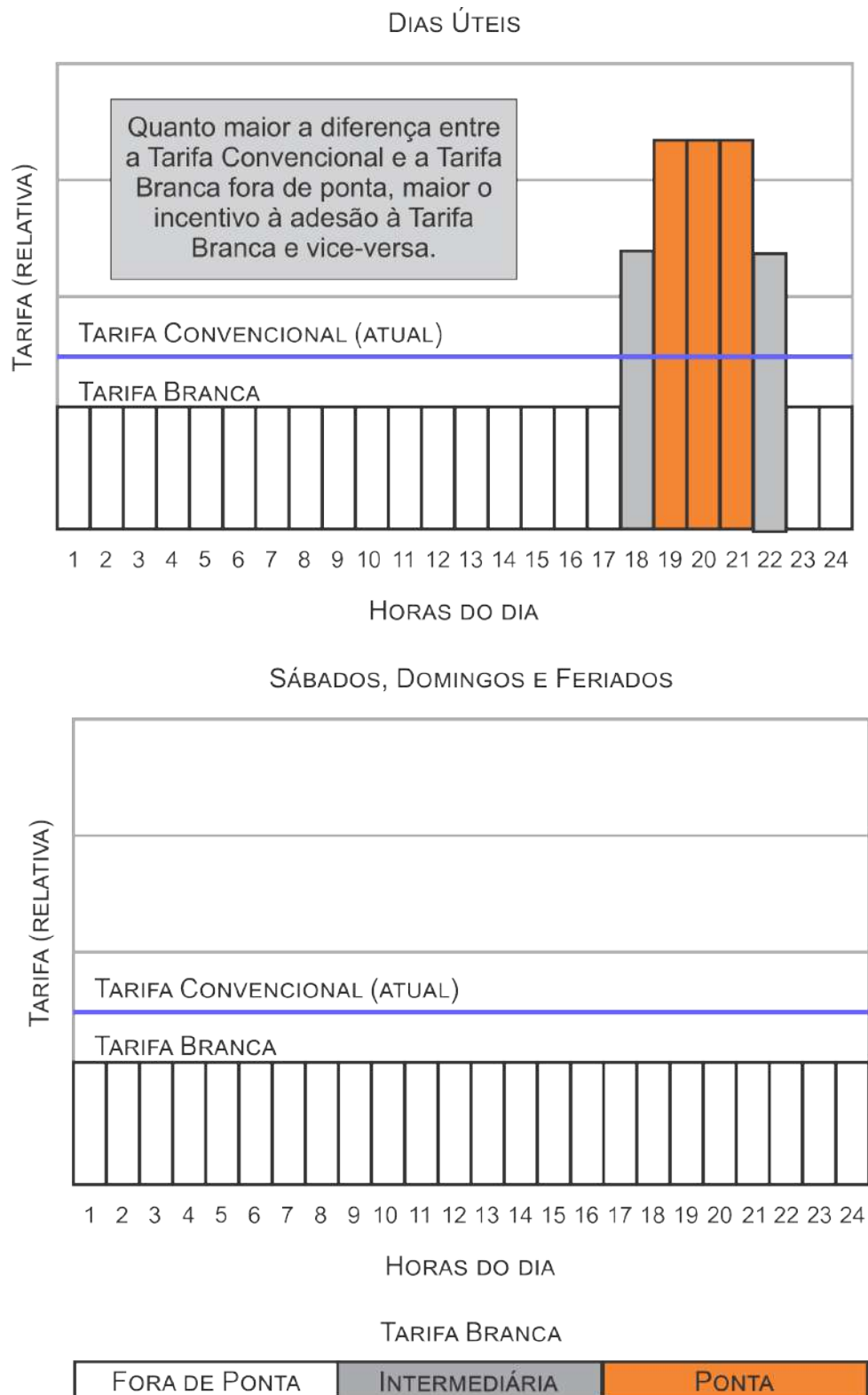
As modalidades previstas pela [Agência Nacional de Energia Elétrica \(2010\)](#) são:

- a) Modalidade convencional monômia: aplicadas às unidades consumidoras do grupo B, em que a tarifação é contabilizada com relação ao consumo de energia, independente das horas de utilização do dia;

- b) Modalidade horária branca: aplicada às unidades consumidoras do grupo B (exceto o subgrupo B4) e para as subclasses de baixa renda do subgrupo B1, em que a diferenciação da tarifa de consumo de energia, de acordo com a hora de utilização;
- c) Modalidade convencional binômia: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas de consumo de energia e demanda de potência, independente das horas de utilização do dia;
- d) Modalidade tarifária horária verde: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifa diferenciada de consumo de energia, dependente do horário de utilização, e uma tarifa única de demanda de potência;
- f) Modalidade tarifária horária azul: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifação diferenciada para consumo de energia e demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia.

Aplicáveis ao grupo B, as tarifas monômia convencional e horária branca se diferenciam pela mudança de preço em horários de ponta, intermediário e fora de ponta. Horário de ponta é aquele que existe maior demanda de energia elétrica, se estende por três horas, e é aplicável em dias úteis. Horários intermediários são caracterizado por uma hora anterior e posterior ao horário de ponta. O restante do tempo e os finais de semanas são considerados horários fora de ponta. Na [Figura 16](#), é possível verificar a diferença entre a tarifação convencional e branca no que diz respeito a tarifa de consumo de energia elétrica. O objetivo da tarifação branca é incentivar consumidores do grupo B a deslocarem o consumo para períodos em que a rede de distribuição se encontra menos exigida.

Figura 16 – Comparativo entre tarifa branca e tarifa convencional.



Fonte: Adaptado de [Agência Nacional de Energia Elétrica \(2019c\)](#).

No caso de consumidores do grupo A, as possibilidades de tarifação são três. Na convencional binômica, existe tarifação do consumo e demanda, mas estes são

fixos, não variando para horário de ponta. A tarifa binômica azul também conta com tarifação de consumo e demanda, sendo que a tarifação de consumo é maior para horários de ponta e intermediários. Na tarifação binômica verde, ambas as tarifações de consumo e demanda variam nos horários de ponta.

A [Empresa de Pesquisa Energética \(2019\)](#) classifica o tipo de resposta a demanda através das diferentes tarifas como reposta baseada em preços, que se refere à mudança no perfil de uso de energia devido às alterações no preço ao longo das horas do dia. Com isso, o consumidor tende a deslocar o uso de energia para momentos em que o preço é mais favorável, e diminui a utilização da rede nos horários de maior uso. No Brasil, as tarifas verde, azul e branca são do tipo *time-of-use* (TOU).

Nas modalidades de tarifação, é possível verificar que *data centers* poderiam se beneficiar daquelas que trazem diferenciação de horário (tarifa branca, azul ou verde). Com o controle de demanda e consumo do *data center* é possível gerenciar as cargas dos subsistemas com o objetivo de diminuição de custos e melhorando a utilização da rede de energia elétrica.

4.2.4 Corte de carga

Entre os meses de janeiro de 2018 a junho de 2019, o ONS em conjunto com a CCEE realizou um programa piloto de resposta de demanda, estabelecido pela Resolução Normativa nº 792/2017 ([AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017b](#)) ([CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019](#)). A resolução tem o objetivo de dar a opção de corte de carga ao ONS em vez de despachar usinas termoeletricas. Podem participar agentes da CCEE na condição de consumidores livres, consumidores parcialmente livres e consumidores que possuam contrato de compra de energia conectados a rede de supervisão do ONS, localizados nos subsistemas Norte e Nordeste.

O acionamento da unidade consumidora cadastrada no programa poderá ser no dia anterior (D - 1) ou intra diário (D - 0), e a duração da redução de demanda pode ocorrer de 1 a 7 horas, com lotes de volume padrão de 1 MW médio e no mínimo 5 MW. A contabilização das reduções da demanda são realizadas mensalmente pela CCEE. O ONS fica responsável por celebrar os contratos e operacionalizar os pedidos de diminuição da demanda através de canal pré acordado.

O procedimento de rede módulo 10.22 estabelece orientações, critérios, requisitos e atividades a serem adotados pelos agentes de distribuição e consumidores livres conectados à rede básica, para elaboração do seu Corte Manual de Carga ([OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2020](#)). Nele, as informações sobre a carga que devem ser contempladas são a prioridade e montantes de carga sujeitos a

corde por subestação do agente de distribuição ou consumidor livre e para cada ponto de conexão à rede de operação.

Este tipo de reposta da demanda é classificado como reposta da demanda baseada em incentivos. Nesta modalidade, são oferecidos incentivos financeiros aos consumidores para redução de demanda em momentos críticos do sistema, quando a oferta de energia está escassa ou quando há queda da confiabilidade. Por isso, são produtos despacháveis, isto é, acionados através de ordem de despacho do operador do sistema ([EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019](#)).

Este programa possui grande aderência a ambientes de *data center*. Com a possibilidade de trabalhar de forma ilhada através dos geradores reservas, estes ambientes podem se candidatar ao programa com o intuito de diminuir o custo operacional. Devido às restrições de potência do programa, somente *data centers* de grande porte, com carga mínima de 5 MW, estarão aptos a fornecer este tipo de serviço.

4.2.5 Fornecimento de energia em rede de distribuição

O fornecimento elétrico em sistemas de distribuição de energia é previsto pela Resolução Normativa nº 482/12 da ANEEL ([AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012](#)). Esta resolução regulamenta os seguintes tipos de geração:

- a) minigeração distribuída: centrais geradoras com potência instalada igual ou menor que 75 kW e que utilizam cogeração qualificada ou fontes renováveis, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- b) microgeração distribuída: centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e inferior ou igual a 5 MW que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

Para a produção de energia ser caracterizada como cogeração qualificada, o gerador deve produzir a partir da mesma fonte de combustível dois ou mais tipos de energia. No caso de geradores térmicos, o aproveitamento do combustível se dá para a produção de energia elétrica através de geradores e de energia térmica, através da energia dissipada, que é utilizada para outros fins como aquecimento de água para processos diferentes, entre outros. Dessa forma, a eficiência do sistema global é aumentada e, se atendidos os requisitos da [Agência Nacional de Energia Elétrica \(2006\)](#), o gerador pode se qualificar para se enquadrar nos programas de incentivo de mini e microgeração.

Os mini e micro geradores podem participar, então, do sistema de compensação de energia elétrica previsto na [Agência Nacional de Energia Elétrica \(2012\)](#). Este sistema prevê que a energia injetada na rede de distribuição pela unidade consumidora é cedida como um empréstimo, que posteriormente será descontado na fatura compensando a energia consumida. Dessa forma, o consumidor irá pagar um valor mínimo, referente a taxa de utilização da rede de distribuição, e a energia excedente, que será a diferença positiva entre a energia injetada e consumida.

A participação de *data centers* em fornecimento de energia através de seus geradores a combustível é bastante rara, mas possível de ser explorada. Para isso, algumas limitações apontadas na [subseção 4.3.1](#) precisarão ser transpostas e possibilidades de utilização de energia térmica para outros processos do *data center* deverão ser exploradas.

4.2.6 Regulamentação no exterior

Internacionalmente, diferentes formas de regulamentação podem ser encontradas com relação a resposta da demanda. A seguir, as formas já empregadas por outras localidades e exemplos de onde estão sendo empregadas.

Com relação à reposta da demanda baseada em preços, as possibilidades são:

- a) *Time-of-use* (TOU): Tipo de tarifa que dividi o dia em períodos de tempo, e cada período possui preço específico, para que se reflita o custo médio da geração e transmissão de energia. Exemplo: Ontário - Canadá;
- b) *Critical Peak Pricing* (CPP): Tarifa que possui preços mais altos durante dias em qua o custo de energia está elevado ou quando a rede elétrica é severamente estressada. Exemplo: Califórnia - Estados Unidos da América;
- c) *Peak Time Rebate* (PTR): Semelhante ao tipo de tarifa CPP, com a diferença em que os consumidores são ressarcidos por reduzir o seu consumo com relação a uma linha base definida. Exemplo: Maryland - Estados Unidos da América;
- d) *Real Time Pricing* (RTP): Tarifa em que os consumidores são informados do preço da energia por hora, mais próximo do preço *spot* de energia, que retratam os custos reais de geração e transmissão a cada hora. Exemplo: Espanha ([EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019](#)).

Já a resposta da demanda baseada em incentivos, as variações deste tipo de programa podem ser classificadas como:

- a) Controle direto da carga: O operador do sistema pode desligar ou reduzir a carga remotamente em momentos pré-definidos. Exemplo: Jiangsu - China;
- b) Interruptibilidade: Em momentos de contingência, a carga integrada é diminuída proporcionando descontos ou créditos na tarifa. Exemplo: Califórnia - Estados Unidos da América;
- c) Demand Bidding ou Participação Econômica nos Mercados de Energia: Os consumidores podem fazer ofertas para redução de carga no mercado de energia, substituindo geradores com despacho mais caro. Exemplo: PJM - Estados Unidos da América;
- d) Programas de Emergência: Recompensa consumidores que reduzem a demanda em momentos de emergência no sistema elétrico. Exemplo: *Electric Reliability Council of Texas* (ERCOT) - Estados Unidos da América ;
- e) Participação no Mercado de Serviços Ancilares: Consumidores ofertam redução de carga para operar como reserva ou regulação de frequência. Se aceita, o preço de mercado é pago para operação em espera destes consumidores. Exemplo: Alberta - Canadá;
- f) Participação no Mercado de Capacidade: Redução de carga de consumidores são ofertadas em mercados de capacidade, para substituição da geração convencional e entrega de novos recursos. Exemplo: PJM - Estados Unidos da América ([EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019](#)).

4.3 Limitações atuais da Operação de *Data Centers* em Conjunto à *Smart Grids*

Dentre o conjunto de possibilidades apresentados na [seção 4.1](#), alguns dos cenários necessitam de mudança na estrutura elétrica do *data center* e evolução das tecnologias para se tornarem viáveis. Mesmo sendo ambientes de *data center* parte da vanguarda da tecnologia para processamento de energia e disponibilidade elétrica, algumas das arquiteturas necessárias para o fornecimento de serviços ancilares não são usualmente utilizadas devido ao alto custo e baixo retorno de investimento.

Dessa forma, serão expostas nesta seção as características necessárias para os diferentes subsistemas para cumprirem papel na manutenção da estabilidade da rede.

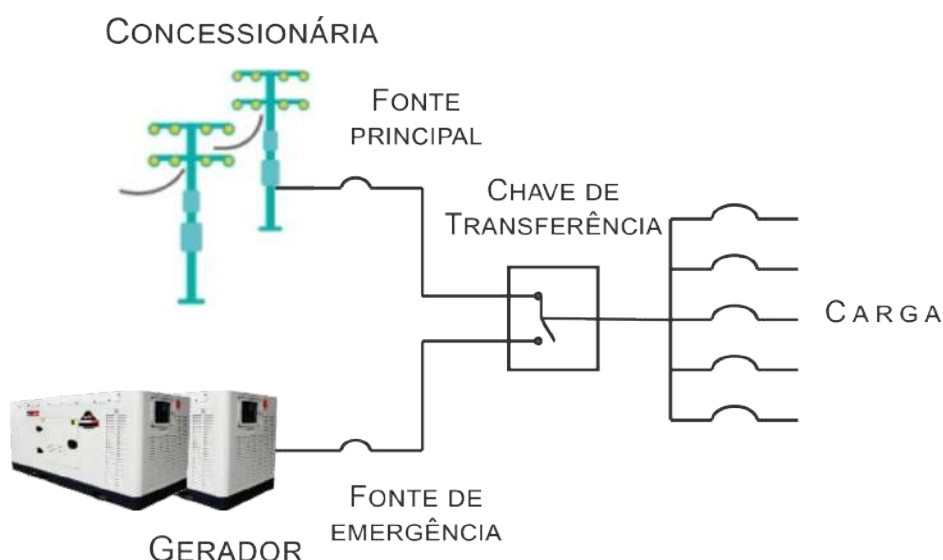
4.3.1 Geradores a Diesel e Chaves de Transferência

O elemento gerenciador da entrada de energia responsável por alimentar a carga crítica é a chave de transferência. Este dispositivo deve realizar, de forma

automática, a detecção de falta de energia pela concessionária, a partida do gerador e quando este estiver pronto para suportar a carga de TI, sua transferência. Equipamentos como a chave de transferência são essenciais para a utilização de geradores reserva e provem toda a proteção necessária para esse tipo de sistema.

As chaves de transferência possuem duas entradas de energia: da concessionária e do gerador, que pode ser visualizada na [Figura 17](#). Em estado padrão, a entrada de energia escolhida para alimentar a carga é a concessionária (chamada de fonte principal). Através de sensores do próprio dispositivo, a fonte de alimentação é monitorada quanto a tensão e a frequência. Se os valores mínimos de tensão ou frequência configurados são alcançados, a chave inicia o processo de transferência da carga para a segunda fonte de energia, conectada ao barramento do gerador, chamada de fonte de emergência ([CUMMINS, 2019](#)).

Figura 17 – Esquemático de funcionamento de uma chave de transferência automática.



Fonte: Adaptado de [Diesel Service & Supply \(2019\)](#)

Para o funcionamento da chave de transferência, é importante que a mesma possua uma variedade de tempos de espera necessários para que a transferência não ocorra sem necessidade, por falsos alarmes. Para que o gerador não seja iniciado sem necessidade, é comumente configurado de 0 a 6 segundos de espera para confirmação de problemas na rede. Assim que a fonte principal é restabelecida, outra espera é necessária para certificar que a carga está estável o suficiente para desligar o sistema de geração. Tipicamente, este tempo varia de 0 a 30 minutos, em que o gerador continua operando sem carga até que recebe um comando para o desligamento. Devido a essa dinâmica mais lenta é necessário manter a carga através de sistema de UPS.

Atualmente, os modelos de mercado destes equipamentos preveem fluxo de potência unidirecional no sentido fonte (principal ou emergencial) para carga. Como

visto anteriormente, para que haja fornecimento de energia do *data center* para a rede elétrica, um projeto diferenciado deverá ser concebido para adaptar os elementos de proteção para que suporte o fluxo bidirecional de potência. Desta forma, tanto a energia dos geradores quanto do UPS poderiam ser utilizadas para sustentar a rede elétrica como mostrado na [subseção 4.2.5](#).

4.3.2 UPS e Baterias

O sistema de UPS e baterias é responsável por manter a carga crítica nos períodos de transferência entre fonte principal e de emergência, como visto na [seção subseção 2.3.1](#). Estes equipamentos são compostos de um conversor de energia alternada para contínua em sua entrada e um conversor de energia contínua para alternada na saída.

Para manter a qualidade da energia para a carga crítica, o conversor de energia de saída é composto de chaves eletrônicas que são controladas para prover uma tensão senoidal de qualidade e na frequência alvo. Contudo, o conversor de entrada, por não haver a necessidade de manipulação da energia, é composto de elementos passivos ou semi-controlados, como diodos e tiristores, que possuem fluxo de potência unidirecional.

Para que o UPS tenha a possibilidade de suprir energia à rede contida em suas baterias, é necessário adaptar este equipamento também para a bidirecionalidade de fluxo de potência. Neste caso, a reformulação da arquitetura destes equipamentos para a bidirecionalidade do fluxo de potência é uma alternativa para adicionar a característica de prover energia à rede neste subsistema.

Além disso, é necessário que sejam desenvolvidas metodologias para a estimativa da capacidade do armazenamento de energia para que o UPS possa prover diferentes serviços como regulação da demanda, participação no corte de carga e até mesmo fornecimento de energia sem risco ao *data center* e a energia necessária para manter as cargas críticas em momentos de emergência. Novas tecnologias de bateria também precisarão ser desenvolvidas ou aprimoradas de forma a aumentar o custo-benefício de aquisição, menor depreciação do tempo de vida da bateria devido a cargas e descargas e maior densidade de energia, como por exemplo as baterias de íons de lítio.

4.3.3 Regulamentação

Os *data centers*, como visto na [seção 4.1](#), podem atuar de diversas maneiras para ajudar a rede elétrica em sua estabilidade e adequação a novas fontes de energia.

Dentre estas possibilidades, a modulação da demanda já é bem estabelecida no Brasil e sua regulamentação prevê incentivos aos consumidores que podem controlar a demanda de seus sistemas. Além desta, a possibilidade de se candidatar ao corte de carga voluntário e ser ressarcido por isso começa a ser regulamentada pela ANEEL e explorada pelo ONS para ajudar na estabilidade da rede elétrica.

Contudo, as outras potencialidades mostradas como o fornecimento de serviço ancilar para controle de frequência e tensão por consumidores não está prevista ainda na legislação. Mesmo sugerido por órgãos importantes como o INEE, esta modalidade ainda não foi concebida e cargas como *data center* não podem prover este serviço por não possuírem meios de serem contratados pelo ONS ou mesmo serem compensados por tal. A participação na geração distribuída também precisa ser desenvolvida de forma a incentivar geradores de energia que, mesmo não sendo caracterizados como cogeneradores ou fontes renováveis, podem contribuir por estarem perto dos centros consumidores e possuírem seus sistemas de geração ociosos grande parte do tempo. Outras formas de fornecimento de energia para suporte a rede em períodos transitórios de instabilidade, como a utilização de baterias, não são previstas na regulamentação e precisarão de aprofundamento a medida que as fontes de energia renováveis estocásticas começarem a figurar com maior representatividade na matriz energética brasileira.

4.3.4 Monitoração e Controle

Todas as formas de contribuição à rede elétrica apresentadas, para serem efetivadas em ambientes como um *data center*, precisam ser controladas e geridas de forma apropriada. Os sistemas de monitoração e controle de *data centers* encontram esse novo desafio, que é incorporar as inúmeras possibilidades de contribuição à rede elétrica e seus respectivos ressarcimentos de forma a ajudar o gestor do ambiente a optar por formas de operar seu sistema com segurança e diminuição de custos.

Neste sentido, estas ferramentas já altamente consolidadas na operação de *data centers* precisarão incorporar o controle das diversas formas de suporte a rede elétrica e trazer ao gestor informações importantes para corroborar a tomada de decisão em aderir a estes programas e monitorar os serviços providos de maneira a trazer valor à operação.

4.4 Conclusão

Para que a nova rede inteligente consiga absorver geração distribuída e fontes de energia intermitentes, as possibilidades de serviços prestados à rede também

deverão ser diversificadas. Serviços ancilares convencionais previam controle sobre unidades geradoras, mas não possuíam visibilidade da carga. A *smart grid*, contudo, faz com que essa perspectiva mude e permite a inclusão dos consumidores nos serviços prestados à rede para sua estabilidade.

Dentre os serviços ancilares possíveis, o auxílio no controle da frequência e na tensão são destacados. Bem consolidados quando efetuados pela geração, possuem grande capacidade de serem fornecidos também pelo consumo. Nesta nova perspectiva, cargas altamente monitoradas e com grande possibilidade como *data centers* se tornam candidatos importantes a desempenhar essa função.

Além dos serviços ancilares, *data centers* podem operar de forma a melhorar a distribuição da demanda de energia consumida ao longo do tempo. Esta estratégia de gestão da carga destes ambientes traz vantagens à rede de distribuição e transmissão, que pode ser melhor utilizada, além de promover maior confiabilidade ao sistema elétrico.

À vista deste assunto, a regulamentação brasileira sobre serviços ancilares e controle de demanda foi analisada. Foi possível verificar que existe necessidade de adaptação para serviços ancilares promovidos pela carga, mas com relação a modulação de demanda, o sistema brasileiro de tarifação já prevê vantagens a consumidores que possuem controle de seu consumo e potência requerida com o intuito de nivelar a exigência da rede elétrica durante o tempo. Ainda, foi verificado que cargas gerenciadas já estão sendo utilizadas em fase de teste para a estabilidade da rede, sendo disponibilizadas para corte.

Em um contexto geral, é possível verificar na [Tabela 3](#) de que forma cada subsistema de um *data center* pode contribuir para a rede elétrica e quais são hoje as limitações que cada subsistema deverá transpor para ser apto a fornecer os serviços. Pela tabela, o controle de demanda poderá ser efetuado pelos sistemas de UPS, refrigeração e carga crítica, que possuem capacidade de modular a energia de entrada do *data center* para que se mantenha em níveis configurados, dependendo da capacidade de cada sistema. O corte de carga parcial poderá ser realizado pelos sistemas de UPS e refrigeração, sendo que o UPS deverá manter a carga crítica através da energia armazenada nas baterias e a refrigeração deverá utilizar o intervalo de temperatura e umidade indicados por norma. O corte de carga total poderá acontecer por meio de acionamento dos geradores reservas através de sinal. Além destes, os sistemas que possuem capacidade de fornecimento de energia (UPS e geradores reserva) também poderão auxiliar a rede quando energia excedente for necessária.

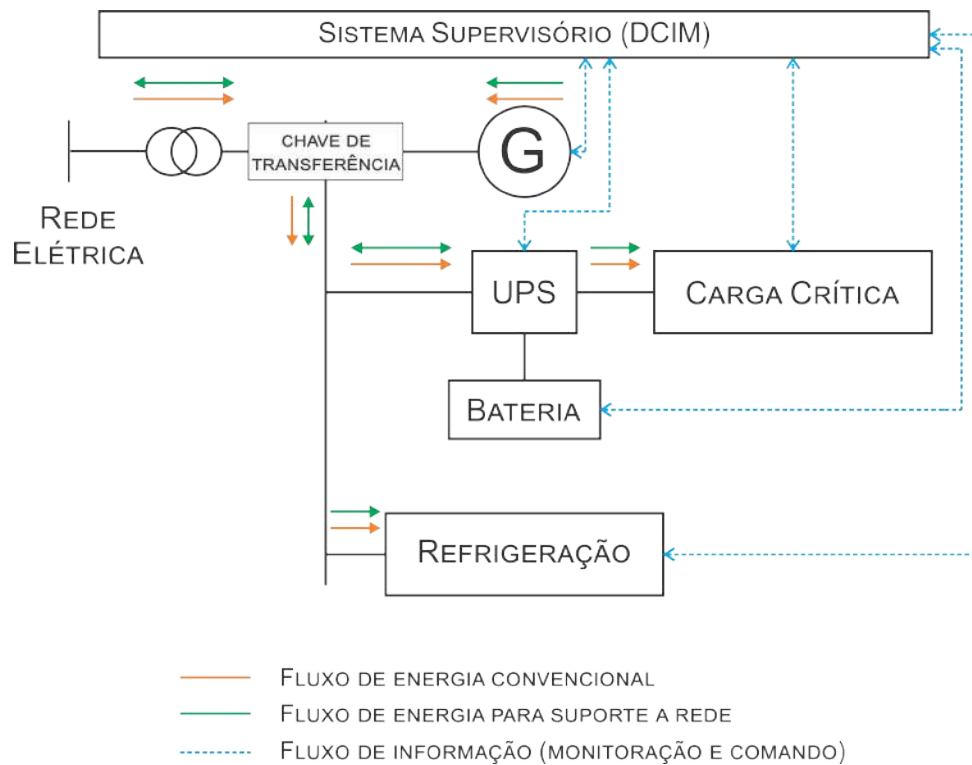
Tabela 3 – *Data center* como suporte à *smart grid*

Sistema	Possibilidades	Limitações
UPS	<ul style="list-style-type: none"> • Controle da demanda • Corte de carga • Fornecimento de energia 	Dimensionamento da bateria; Dimensionamento da bateria; Entrada de energia bidirecional do UPS e da instalação elétrica e regulamentação.
Refrigeração	<ul style="list-style-type: none"> • Controle da demanda • Corte de carga 	Tempo de inércia da temperatura; Tempo de inércia da temperatura.
Carga Crítica	<ul style="list-style-type: none"> • Controle da demanda 	Restrição de SLA e degradação do serviço.
Geradores Reserva	<ul style="list-style-type: none"> • Corte de carga • Fornecimento de energia 	Tempo de transferência da carga para o gerador; Bidirecionalidade da instalação elétrica e chave de transferência; Regulamentação.

Fonte: Elaboração Própria (2020).

Uma discussão das limitações que o *data center* enfrenta foi realizada, tendo foco nos sistemas de transferência de carga, UPS, monitoramento do *data center* e legislação brasileira com relação ao assunto. Dentre as questões apontadas nesta seção, a bidirecionalidade de energia, característica inerente a *smart grid*, foi um grande limitador da atuação do *data center* como contribuidor da estabilidade de rede. Desta forma, uma evolução da estrutura elétrica do *data center* se faz necessária, como é possível verificar na [Figura 18](#), para que as propostas estudadas sejam viáveis na prática.

Figura 18 – Esquemático do fluxo de energia e informação no *data center*.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Conclui-se então que *data centers* são forte candidatos a auxiliar a rede elétrica no que diz respeito a sua estabilidade. Modos de como é possível prover estes serviços serão analisados e simulados no [Capítulo 6](#) e formas de como incorporar estas novas possibilidades em uma ferramenta de gestão de *data centers* serão discutidos no [Capítulo 7](#).

5 MODELAGEM DOS SUBSISTEMAS DE UM *DATA CENTER*

Neste capítulo, os principais subsistemas de um *data center* serão modelados e verificados com o objetivo de simular os efeitos do auxílio de um *data center* no conceito das *smart grids*. Desta forma, os modelos necessários para a simulação de um estudo de caso serão apresentados através da utilização da ferramenta computacional Matlab®. Com estes modelos, os cenários previstos no Capítulo 4 poderão ser simulados no Capítulo 6 para a verificação da viabilidade destas estratégias e seus efeitos na rede elétrica.

Neste sentido, serão modelados em suas características elétricas os sistemas:

- a) Carga crítica, que consistem nos equipamentos de redes e TI alojados no *data center*, responsáveis pelo processamento e armazenamento de dados, finalidade principal do ambiente;
- b) Sistema de refrigeração, responsável por retirar o calor gerado pela carga crítica e sistemas auxiliares do ambiente;
- c) Sistema de UPS e baterias, que tem o objetivo de suprir energia em momentos de ausência de fornecimento pela concessionária de forma rápida para prevenir a parada de sistemas;
- d) Geradores auxiliares, responsáveis por assumir a geração de energia durante ausência da concessionária; e
- e) interconexões necessárias entre sistemas e suas dependências para a configuração dos diferentes cenários propostos no estudo de caso.

Os sistemas citados acima, essenciais à operação de ambientes de missão crítica, serão modelados de forma que a dinâmica elétrica de cada um e suas interações possam ser avaliadas nos cenários de modulação de perfil de carga, cortes de carga e fornecimento de energia à rede elétrica.

A dinâmica a ser considerada na modelagem destes subsistemas será relacionada ao fornecimento, processamento e utilização da potência elétrica ativa por estes elementos e sua influência no conjunto para cada cenário do estudo de caso realizado no Capítulo 6. Essa perspectiva foi escolhida por apresentar figuras de mérito suficientes à análise dos cenários estabelecidos, que serão considerados posteriormente para a inclusão em um sistema de supervisão de *data centers*, de forma

a agregar funcionalidades importantes para a tomada de decisão dos gestores de *data center*.

Para as simulações dos modelos, será utilizado o ambiente de modelagem Simulink® configurado com o algoritmo de simulação de passo variável selecionado automaticamente ode23t (*mod stiff/Trapezoidal*) e passo de cálculo automático com tamanho máximo de 20.

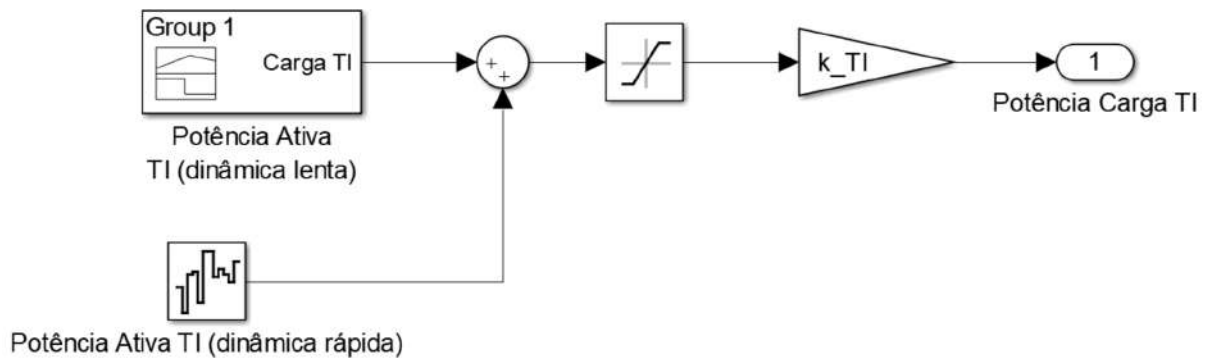
5.1 Carga Crítica

A carga crítica considerada em *data centers*, e por sua vez neste modelo, serão os elementos de TI e rede que realizam o trabalho de processamento, armazenamento e comunicação de dados. Estes elementos, como citado no Capítulo 2, são os servidores, *storages*, *blades*, *switches*, entre outros. Estes equipamentos, conforme sugerido na NBR 14565 da [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#), são alocados em salas específicas, chamadas de sala de computadores.

Em termos da simulação a ser realizada, a potência demandada por estes equipamentos será modelada como a variável independente deste sistema. Neste contexto, a carga crítica é assumida como um sinal de amplitude entre 0 e 1 da potência total projetada para o *data center*, que é uma constante de projeto. Este valor será multiplicado pela constante de projeto e será entregue aos sistemas subsequentes para ser processada, gerada ou retirada do sistema através de refrigeração.

Deste modo, na [Figura 19](#) é apresentado o sistema modelado. Na figura, é possível observar os sinais que compõe a carga de TI, que serão um sinal personalizado para dinâmicas lentas e um sinal de ruído branco para dinâmicas rápidas. A soma destes dois sinais estão dentro do intervalo 0 e 1, que então é multiplicado por uma constante que será a potência máxima do *data center*.

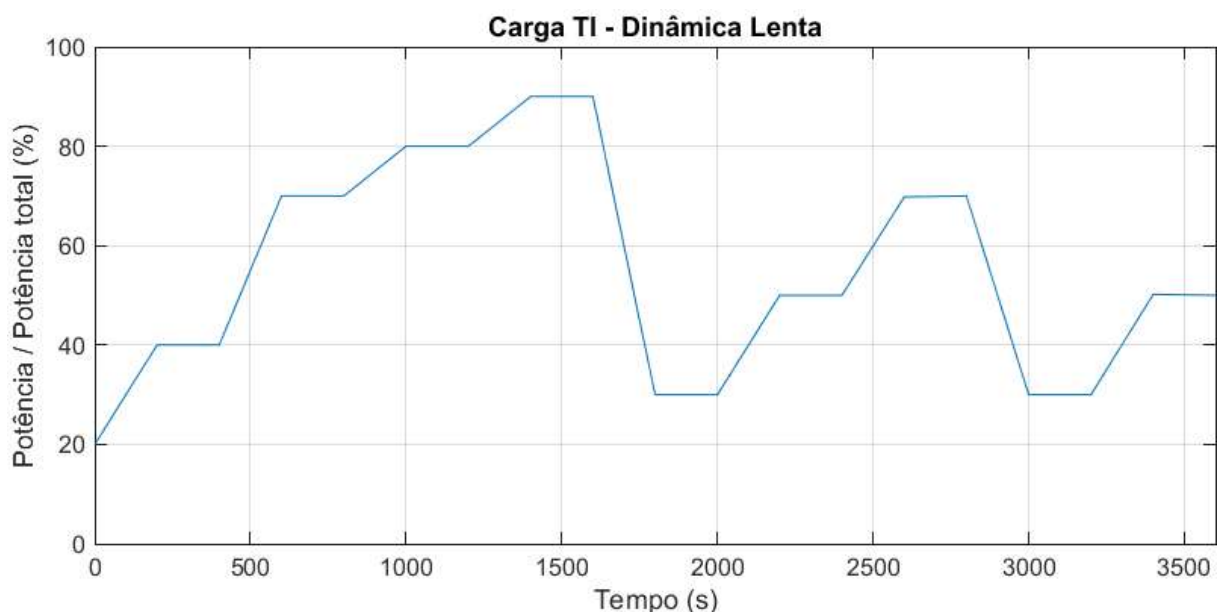
Figura 19 – Modelo da carga de TI de um *data center* em Matlab ®.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

A demanda de processamento de dados em *data centers* é muito variável e depende dos processos agendados para serem executados e das requisições que as aplicações sendo processadas recebem. Essa dinâmica se relaciona muito aos tipos de serviços oferecidos pelo *data center*. Dado esta característica, o modelo levará em consideração um perfil de carga específico para o estudo de caso desejado, e o projeto do modelo se dará de forma que esta demanda seja facilmente alterada para outros estudos de caso, e outros *data centers*. Com isso, a [Figura 20](#) apresenta a dinâmica lenta da carga de TI para o estudo de caso a ser realizado. Foi definido uma dinâmica com grande amplitude, que varia de 20% a 90% do total de carga de projeto, para validar os cenários de apoio à *smart grid* em um cenário extremo de perfil de carga.

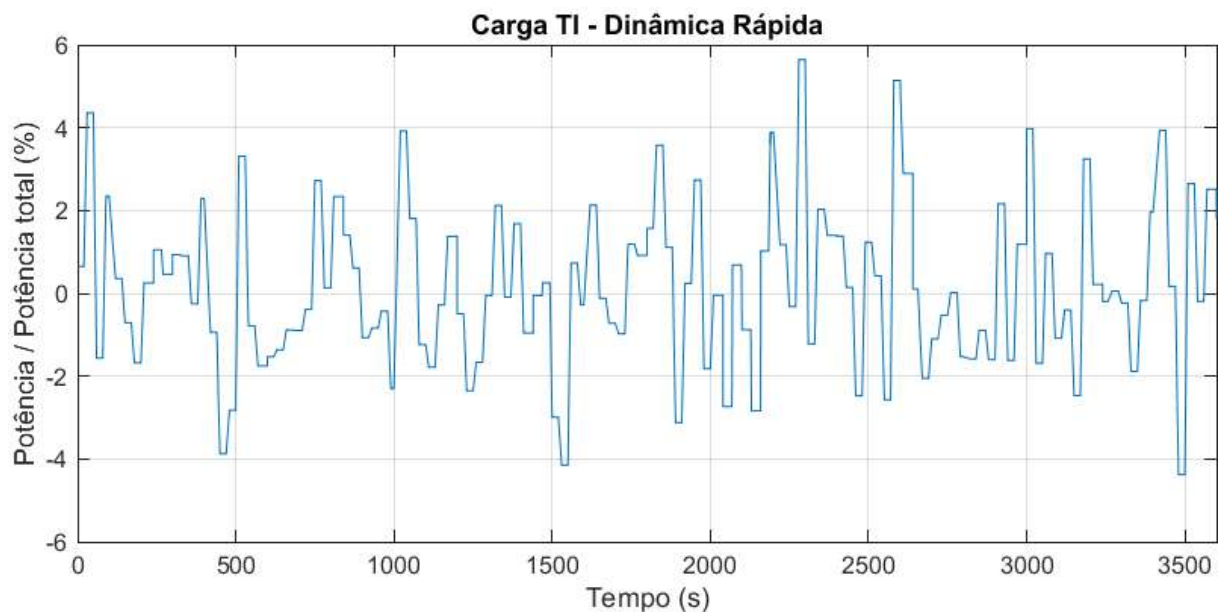
Figura 20 – Modelo da dinâmica lenta da carga de TI do *data center* em Matlab ®.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Na [Figura 21](#) é possível verificar em detalhe o sinal utilizado para validar a dinâmica rápida da carga, adicionada ao perfil de carga base para validar cenários de apoio à *smart grid* em que a dinâmica dos elementos de apoio a rede sejam menores que 1 minuto. Neste caso, o bloco utilizado será um gerador de ruído branco com densidade de potência no espectro de 0,01 e tempo de amostragem de 30 s. Além desses elementos, um bloco de saturação foi adicionado para garantir que o sinal não excederia os limites de 0 e 1.

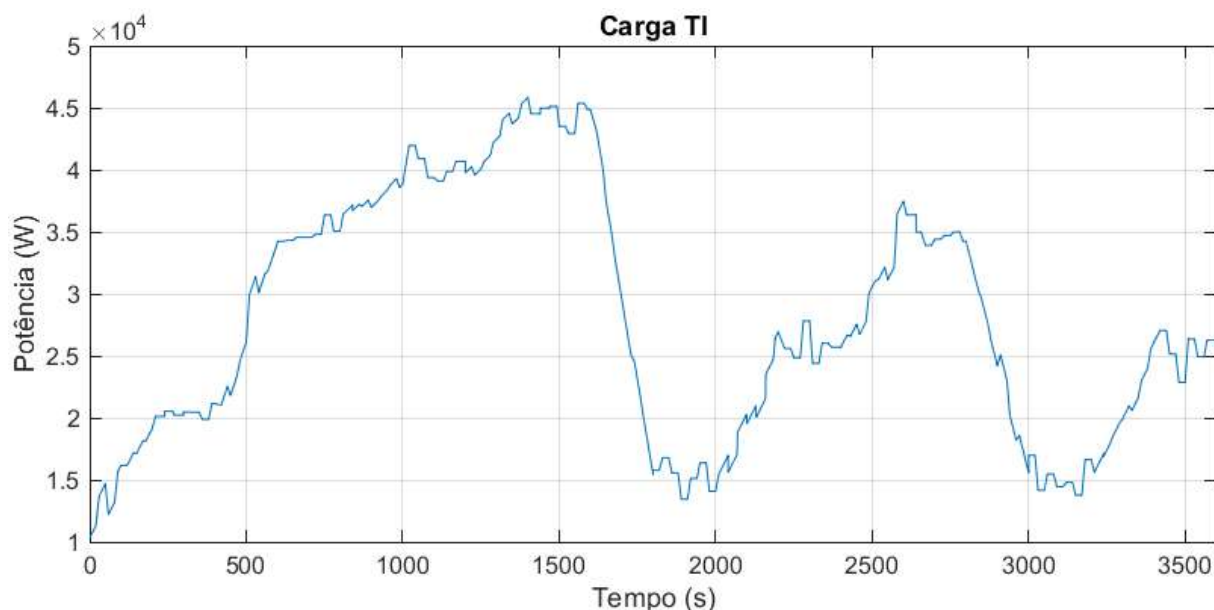
Figura 21 – Modelo da dinâmica rápida da carga de TI do *data center* em Matlab ®.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Na [Figura 22](#), o sinal apresentado é a soma das duas dinâmicas, que representará a carga de TI total, já multiplicado pelo valor da potência da carga de TI projetada, que dependerá do estudo de caso a ser analisado. Para o estudo de caso a ser analisado, a carga total de TI projetada é de 50 kW.

Figura 22 – Modelo do perfil de carga de TI do *data center* a ser analisado no estudo de caso em Matlab®.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

5.2 Refrigeração

A modelagem do sistema de refrigeração será abordada a partir da perspectiva termodinâmica do ambiente. *Data centers* são ambientes que consomem grandes quantidades de energia por área, e devido à característica de sua carga, dissipam essa energia na forma de calor. Para promover o funcionamento regular e contínuo destes ambientes, esse calor precisa ser retirado, e por isso sistemas de refrigeração são utilizados.

Para a modelagem deste subsistema, algumas considerações serão admitidas. O ambiente será considerado isolado termicamente. Isso se dá devido a estrutura do *data center* ser projetada sem janelas e com as paredes tratadas termicamente com isolamento em relação ao meio externo, quando construído de acordo com as recomendações da norma NBR 14565 da [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#). Também devido a características de operação destes ambientes, a presença de pessoas nas salas de TI e elétrica é uma exceção. Estes ambientes são operados remotamente e a intervenção humana se dá apenas em ocasiões isoladas, quando extremamente necessárias e representam uma parcela muito pequena da carga térmica total.

Além disso, devido a característica da carga do *data center*, que é de consumo de energia para processamento e armazenamento de informação, será considerado que toda a potência elétrica requerida pela carga será dissipada em forma

de calor. Pode-se considerar desta forma pois pouca energia utilizada pela carga é convertida para a forma mecânica, e esta quando gerada também é dissipada no ambiente isolado (exemplo, ventiladores dos servidores conhecidos como *coolers*). Desta forma, para atender o princípio de conservação de energia, será admitido neste modelo que a energia elétrica que entra no sistema é dissipada em forma de calor pelos equipamentos de TI. As mesmas considerações feitas para a carga crítica serão aplicadas para a potência dissipada devido ao critério de eficiência do sistema de UPS e baterias.

A tecnologia empregada na refrigeração de ambientes de missão crítica indicada é a de condicionadores de ar de precisão. Ela é empregada porque a arquitetura de *data centers*, que possuem piso elevado, é indicada para a adoção de refrigeração de ciclo fechado. O ar frio é insuflado pelo piso nos corredores frios, e retorna pelo corredor quente, e através do confinamento dos corredores, o menor caminho a percorrer pelo ar é pelos equipamentos de TI (MIDEA, 2012). Os equipamentos de precisão são indicados porque, em uma sala de computadores, a carga térmica é composta praticamente de calor sensível (calor que aumenta ou diminui a temperatura de bulbo seco) e equipamentos de precisão são projetados para atender essa relação de alto nível de calor sensível. Estes equipamentos podem utilizar ar refrigerado, água refrigerada (com torre de resfriamento ou *chillers*) ou glycol refrigerado (EVANS, 2012).

Para a avaliação da dinâmica térmica do sistema, as salas refrigeradas (sala de computadores e salas elétricas de suporte) serão consideradas o volume de controle. Como apresentado por Silva (2010), para as trocas de calor, pode-se utilizar a equação:

$$\dot{Q}_t = [m \cdot c_{ar} \cdot \Delta T] \quad (3)$$

Sendo $\dot{Q}_t$ a variação de energia do sistema, m a massa de ar do ambiente, c_{ar} o calor específico do ar e ΔT a variação da temperatura. Considerando a taxa de entrada e saída de ar constante no volume de controle no regime permanente e analisando a dinâmica do sistema no tempo, pode-se obter:

$$\dot{q}_t(t) = [v \cdot \rho \cdot c_{ar} \cdot T(t)] \quad (4)$$

Onde $\dot{q}_t(t)$ é a variação de energia do sistema no tempo, v é o volume do ambiente e ρ é a densidade do ar. Para relacionar a potência à variação de energia, pode-se utilizar a equação:

$$\dot{q}_t(t) = \int_0^t p(t) dt \quad (5)$$

Onde $p(t)$ é a potência entregue ao sistema, convertida para energia térmica. Dessa forma, pode-se concluir que:

$$\int_0^t p(t)dt = [v \cdot \rho \cdot c_{ar} \cdot T(t)] \quad (6)$$

O modelo da variação de temperatura no ambiente do *data center* considerado será o seguinte:

$$\int_0^t (p_c(t) - p_r(t))dt = [v \cdot \rho \cdot c_{ar} \cdot T(t)] \quad (7)$$

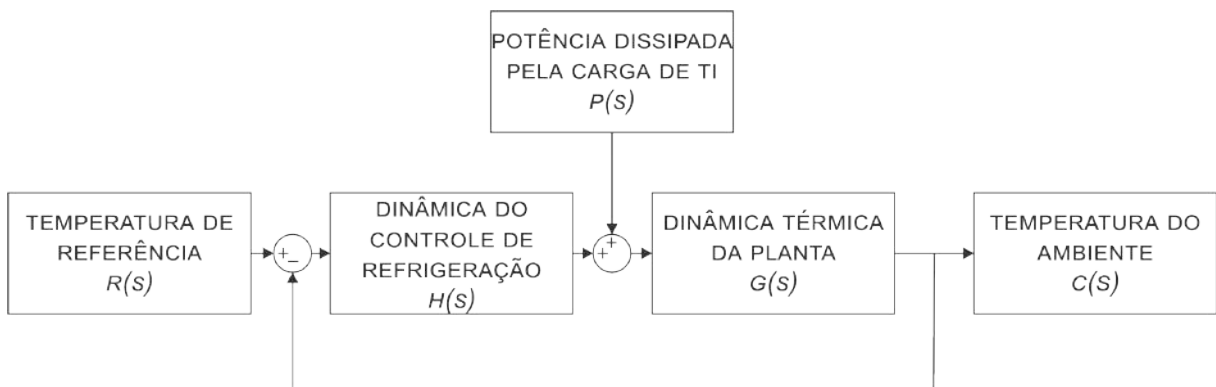
Tendo como $p_c(t)$ a potência da carga crítica e a potência de perdas no sistema de UPS e $p_r(t)$ a potência retirada pelo sistema de refrigeração. A potência fornecida ao sistema de refrigeração foi definida como:

$$p_r(t) = EER \cdot p_{cr}(t) \quad (8)$$

Em que EER é o índice de eficiência de energia fornecido por fabricantes de refrigeração e $p_{cr}(t)$ é a potência consumida pelo sistema de refrigeração. Desta forma, pode-se relacionar a potência entregue a carga de TI e eficiência do UPS em relação a temperatura do ambiente.

Com esta relação, é necessário inserir no modelo a dinâmica de funcionamento das máquinas de refrigeração. Apesar de cada fabricante possuir uma estratégia própria de controle da temperatura interna do *data center*, é possível generalizar um tempo de atuação da refrigeração. No caso deste modelo, o controle de temperatura efetuado pelas máquinas de refrigeração será analisado através de um sistema realimentado com as características apresentadas na [Figura 23](#).

Figura 23 – Modelo do controle de temperatura pelo sistema de refrigeração de um *data center*.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Neste contexto, e através da [Equação 6](#), podemos modelar a dinâmica da planta do sistema, no domínio da frequência através da transformada de Laplace conforme:

$$G(s) = \frac{1}{v \cdot \rho \cdot c_{ar}} * \frac{1}{s} \quad (9)$$

$$K_p = \frac{1}{v \cdot \rho \cdot c_{ar}} \quad (10)$$

$$G(s) = \frac{K_p}{s} \quad (11)$$

Em que s representa a frequência complexa do sistema. A dinâmica do controle de refrigeração foi, então, aproximada para um sistema de primeira ordem com constante de tempo de 5 minutos, tempo necessário para que o controle da refrigeração alcance o valor de 99% da temperatura de regime permanente. Visto que a planta possui um integrador e o sistema, realimentado, possui uma dinâmica de 2ª ordem, optou-se por não inserir maior complexidade ao modelo. Neste caso, o sistema pode ser representado por:

$$H(s) = \frac{K_c}{Ts + 1} \quad (12)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + H(s)G(s)} \quad (13)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_c K_p}{Ts^2 + s + K_c K_p} \quad (14)$$

Tomando em comparação um sistema de 2ª ordem dado por:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\epsilon\omega s + \omega^2} \quad (15)$$

O modelo especificado então foi adotado para ser criticamente amortecido ($\epsilon = 1$) e com tempo de acomodação de 1% de 5 minutos ($t_{s1\%} = 300s$). Segundo [Ogata \(1985\)](#), a seguinte figura de mérito é obtida:

$$t_{s1} = 4.6\tau = \frac{4.6}{\epsilon\omega} = 300 \quad (16)$$

$$\omega = 0,0153 \quad (17)$$

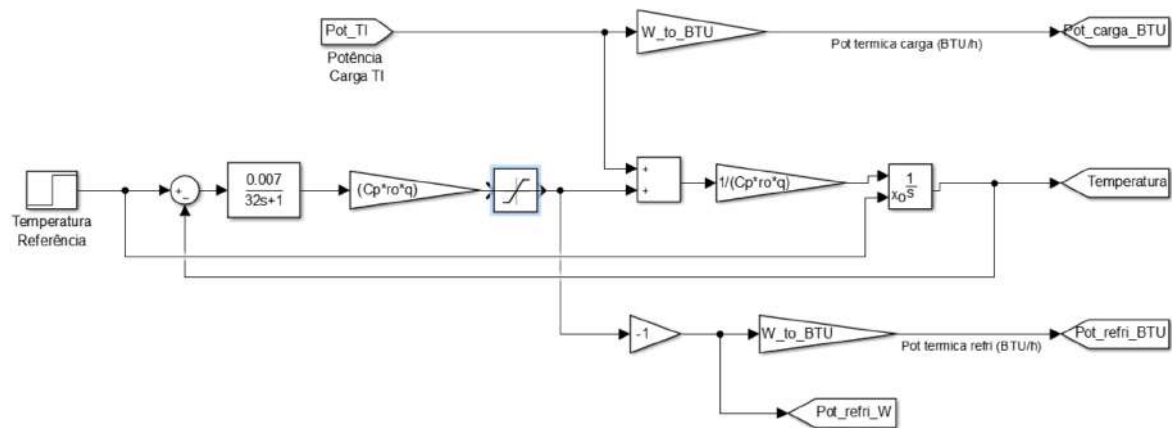
$$T = \frac{1}{2\epsilon\omega} = 32 \quad (18)$$

$$K_c = \frac{\omega^2 T}{K_p} = \frac{0.007}{K_p} \quad (19)$$

$$H(s) = \frac{0.007}{32s + 1} * \frac{1}{K_p} \quad (20)$$

A modelagem do sistema, então, foi implementada conforme apresentado na [Figura 24](#):

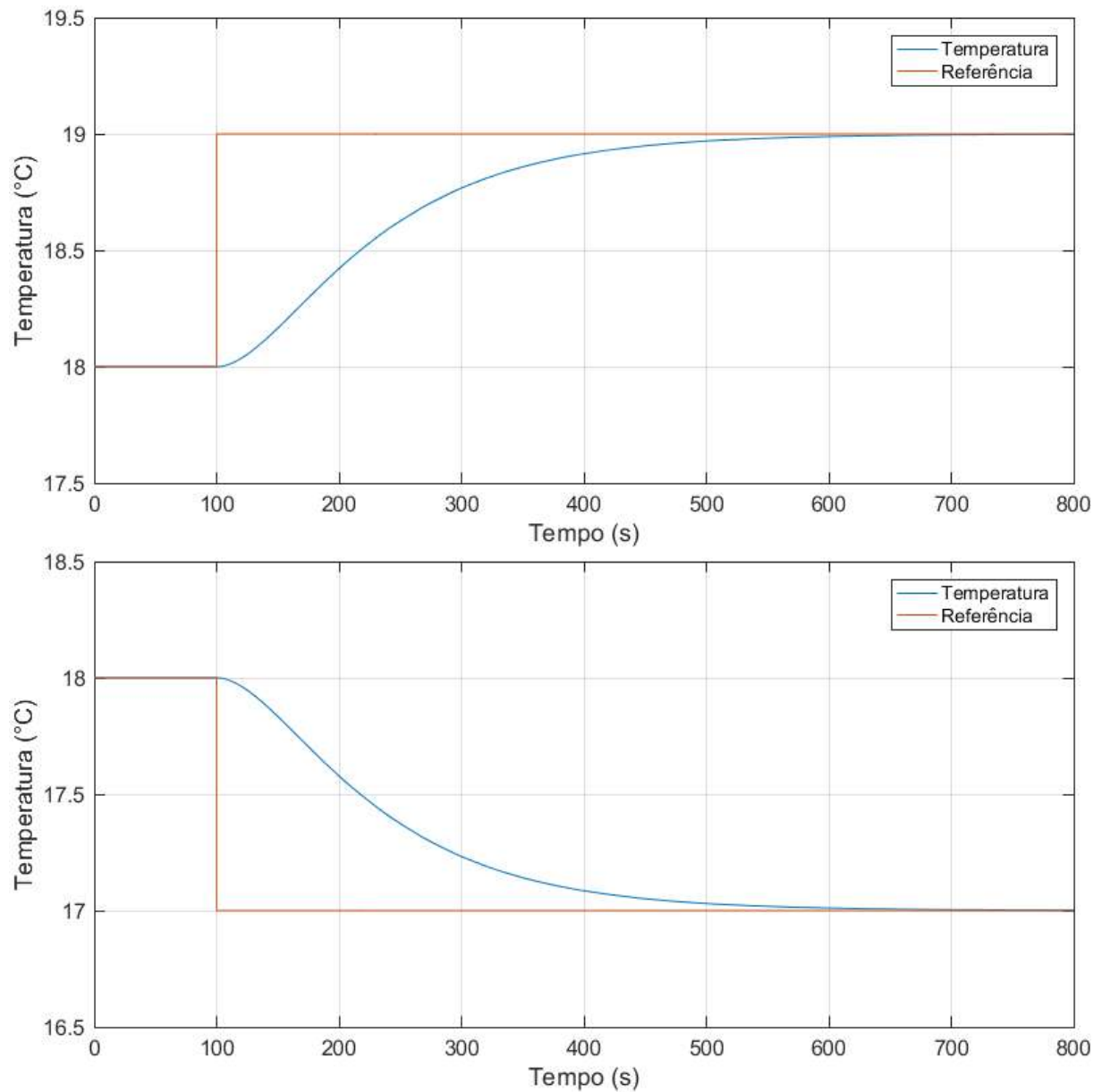
Figura 24 – Modelo do consumo de energia pelo sistema de refrigeração de um *data center* em Matlab ®.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

A resposta para uma alteração do tipo degrau da referência pode ser visualizada na [Figura 25](#), obedecendo aos parâmetros especificados no modelo.

Figura 25 – Resposta a um degrau da referência (temperatura) de 18 °C a 19 °C e 18°C a 17°C pelo modelo de refrigeração em Matlab ®.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Devido à característica do controle da planta, e para não aumentar o grau de complexidade do sistema, o modelo apresenta erro em regime permanente por causa da entrada de perturbação (no caso, a potência dissipada da carga de TI). O cálculo do erro em regime permanente relativo à entrada de uma perturbação em degrau segue:

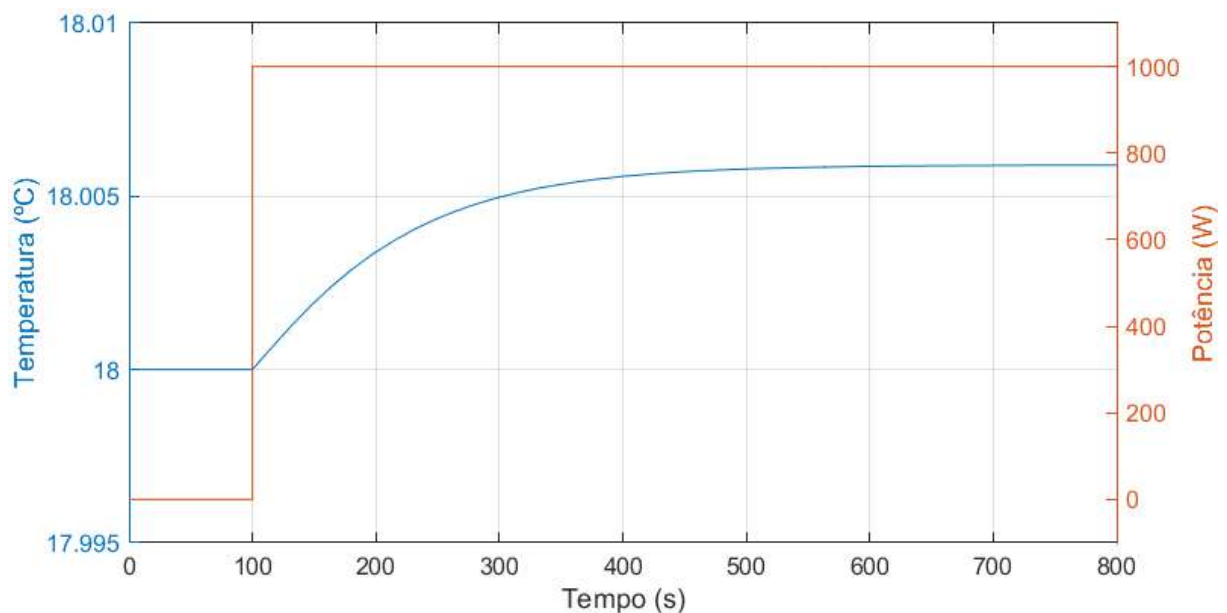
$$E(s) = \frac{1}{1 + H(s)G(s)} \quad (21)$$

$$E(0) = \frac{1}{1 + H(0)G(0)} \quad (22)$$

$$E(0) = \frac{1}{1 + K_p K_c} \quad (23)$$

Apesar do erro, este em regime permanente apresentou-se pequeno devido a ordem de grandeza da constante K_c , como é possível observar na [Figura 26](#).

Figura 26 – Dinâmica de perturbação no modelo de refrigeração em Matlab ®.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Neste modelo, não foi considerada a dinâmica da umidade relativa do ar, que depende da temperatura e será reservada a trabalhos futuros.

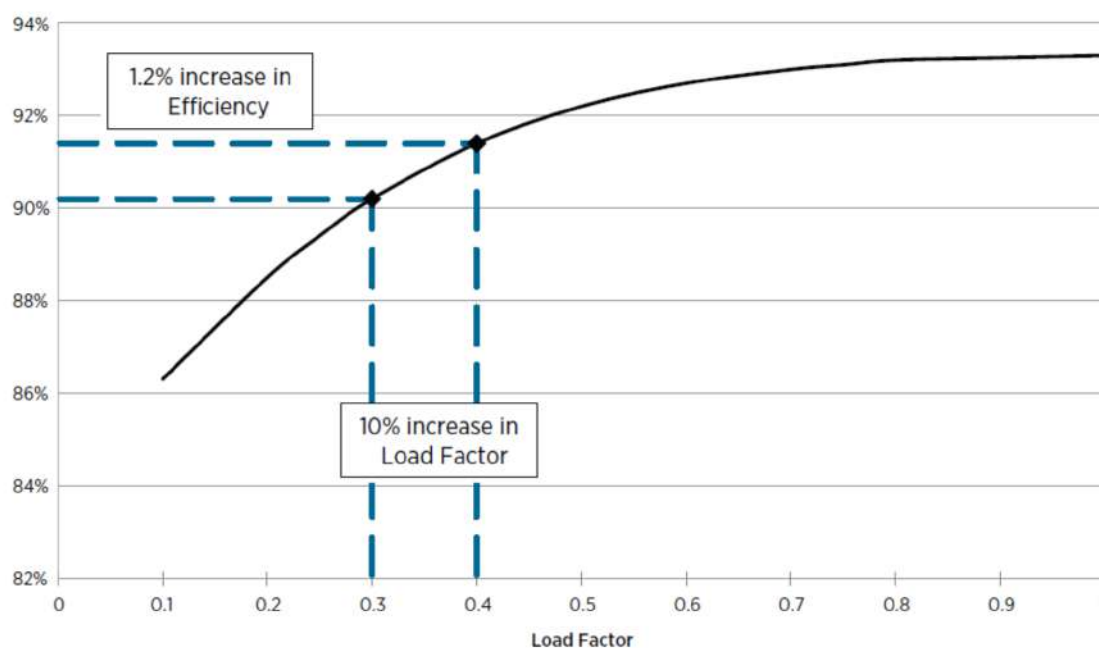
5.3 UPS e baterias

O subsistema de UPS é responsável por fornecer energia de forma rápida a carga de TI quando a rede elétrica provida pela concessionária de energia estiver indisponível. Como apresentado na [subseção 2.3.1](#), o subsistema de UPS é composto de um retificador de tensão, que converte a energia de entrada de tensão alternada para contínua, um sistema de gerenciamento de baterias (BMS - *Battery Management System*), que controla a carga e descarga das baterias instaladas e conectadas à etapa de tensão contínua do UPS e um inversor de tensão, que converte novamente

a energia de tensão contínua para alternada, e assim supre energia à carga de TI. Segundo recomendação da NBR 14565 da [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#), o subsistema de refrigeração não deve ser suportado pelo UPS, que deve ser exclusivo para a carga crítica. Além do fornecimento de energia, o UPS também pode ser responsável por fornecer energia de qualidade à carga de TI e isolar a mesma de surtos que possam ocorrer na rede elétrica, protegendo os equipamentos, dependendo de sua arquitetura.

Devido às conversões de energia necessárias para o funcionamento do UPS, na perspectiva da potência processada por este subsistema, é necessário avaliar sua eficiência. As conversões são realizadas por elementos não lineares e microprocessados que apresentam impedância e comutações que causam perda de energia e diminuem a eficiência global do subsistema. Para a avaliação da eficiência, [VanGeet e Tschudi \(2011\)](#) apresenta uma curva geral da eficiência do sistema devido seu fator de carga, apresentada na [Figura 27](#).

Figura 27 – Curva de eficiência de um UPS em relação ao seu fator de carga.

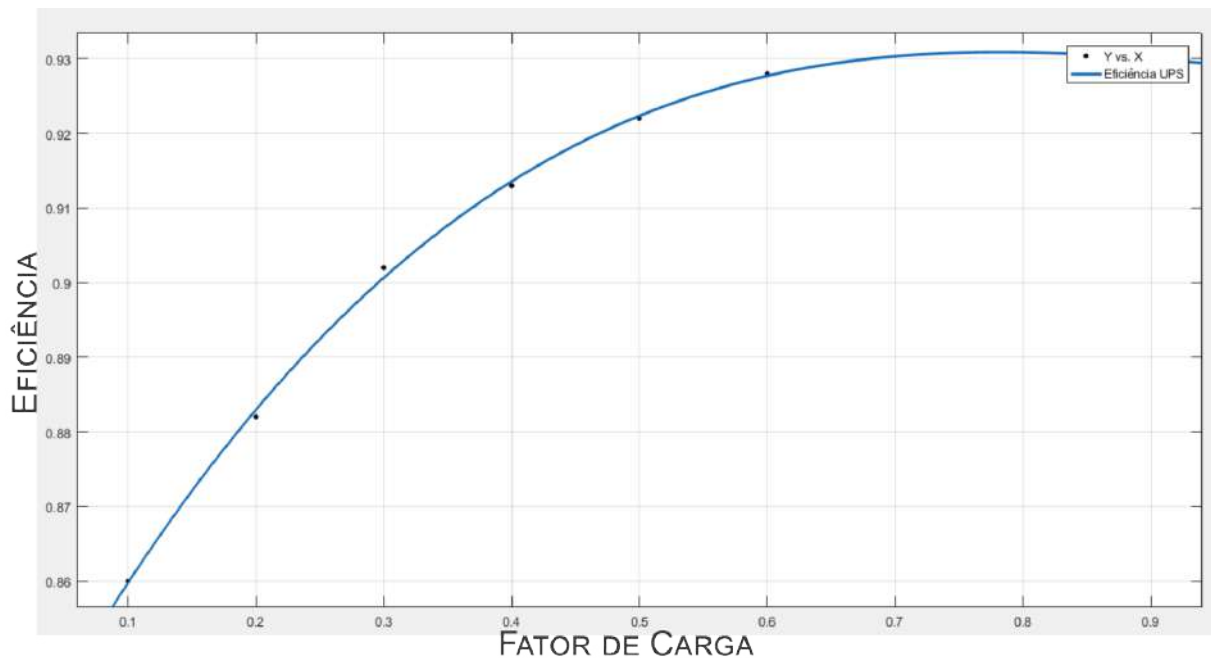


Fonte: [VanGeet e Tschudi \(2011\)](#).

Para a modelagem do sistema de UPS, não foram considerados detalhes do processamento de energia. A análise feita seguiu no contexto da energia processada e quais seriam as perdas que deverão ser adicionadas a potência do sistema, em relação ao nível de carga demandada pelos equipamentos de TI. Para isso, aproximou-se a curva de eficiência através da ferramenta Matlab retirando 5 pontos do gráfico apresentado e realizando uma aproximação linear através de um polinômio de 3ª ordem,

apresentado na [Figura 29](#).

Figura 28 – Curva de eficiência de um UPS em relação ao seu fator de carga.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

O polinômio obtido através desta estratégia é:

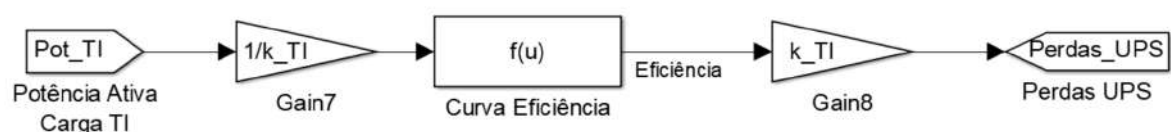
$$F(u) = 0.1134 * u^3 - 0.3417 * u^2 + 0.3263 * u + 0.8304 \quad (24)$$

Desta forma, o cálculo das perdas de potência no sistema de UPS é realizado da seguinte forma:

$$P(u) = (0.1134 * u^3 - 0.3417 * u^2 + 0.3263 * u + 0.8304) * u - u \quad (25)$$

Sendo u a potência requerida pela carga de TI e $P(u)$ a potência dissipada no sistema de UPS. Para a realização de estudos de caso diferentes, esta curva pode ser adaptada para modelos de UPS específicos, sem prejuízo do modelo geral. A implementação do modelo de eficiência do UPS, então, foi feita conforme a [Figura 29](#).

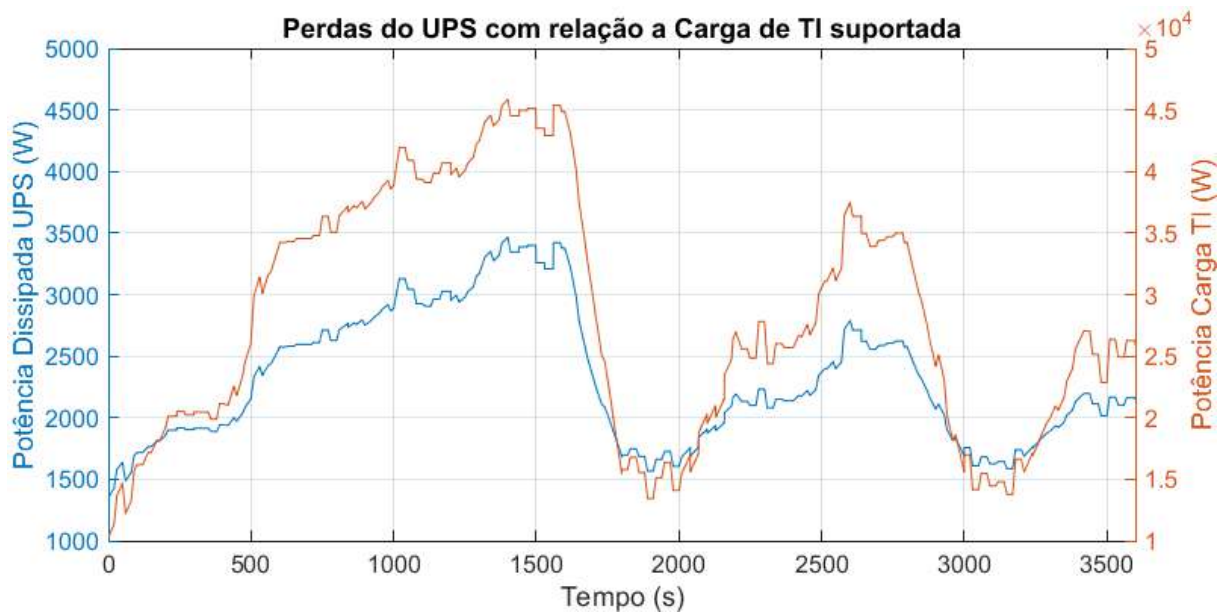
Figura 29 – Modelo para estimativa das perdas no UPS.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Esta potência, dissipada no UPS, é somada ao sistema geral para a verificação da potência demandada do *data center*. Aplicando um sinal de potência de carga de TI, obtemos os seguintes resultados apresentados na [Figura 30](#). Através da figura, é possível observar a não linearidade do comportamento da eficiência do UPS e parcela de perda para diferentes níveis de fator de carga.

Figura 30 – Gráfico das perdas do UPS devido a uma potência de entrada da carga de TI.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Para a modelagem do fornecimento de energia através das baterias, três tipos mais comuns de UPS foram considerados. Estes são:

- UPS *Offline* ou *Stand-by*: em que a carga é alimentada diretamente pela rede, não sendo protegida em termos de qualidade de energia. Neste caso, o UPS verifica as condições da rede elétrica e, quando percebida a ausência de energia de alimentação, transfere a carga para as baterias com um tempo de transferência em torno de 8 ms.
- UPS *Line Interactive*: similar ao tipo *Offline*, com a diferença de que neste tipo de UPS existe regulação de tensão. A carga é alimentada pela rede elétrica, mas com um estágio de regulação de tensão fornecido pelo UPS. Neste modelo, o tempo de transferência entre a rede elétrica e a bateria é de até 4 ms.
- UPS *Online* ou de dupla conversão: neste modelo, toda a energia disponibilizada à carga é processada pelo UPS e as baterias se mantêm disponíveis a todo o tempo. Este modelo protege a carga com relação a surtos de energia e precariedade da

energia fornecida pela rede. Não existe tempo de transferência da carga para a bateria, visto que estas são mantidas conectadas (CUNHA, 2009).

O tipo de UPS utilizado em *data centers* mais comum é o de dupla conversão. Mesmo assim, as fontes utilizadas para a alimentação dos equipamentos de TI geralmente atendem as especificações técnicas normatizadas pela [International Electrotechnical Commission \(2016\)](#), o que torna o tempo de transferência entre rede elétrica e baterias, mesmo para os tipos de UPS *Offline* e *Line Interactive*, transparente no sentido de fluxo de potência. Por este motivo, o modelo considerou a transferência entre fonte primária de energia e baterias instantânea.

Por fim, a modelagem da carga, descarga e estado de carga (SOC - *State of charge*) da bateria foram analisados. Segundo as recomendações da NBR 14565 da [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#), o armazenamento de energia do UPS deve prever o fornecimento de energia para o total de carga crítica estipulado em projeto por 15 minutos. Por este motivo, a energia armazenada nas baterias foi modelada pela seguinte equação:

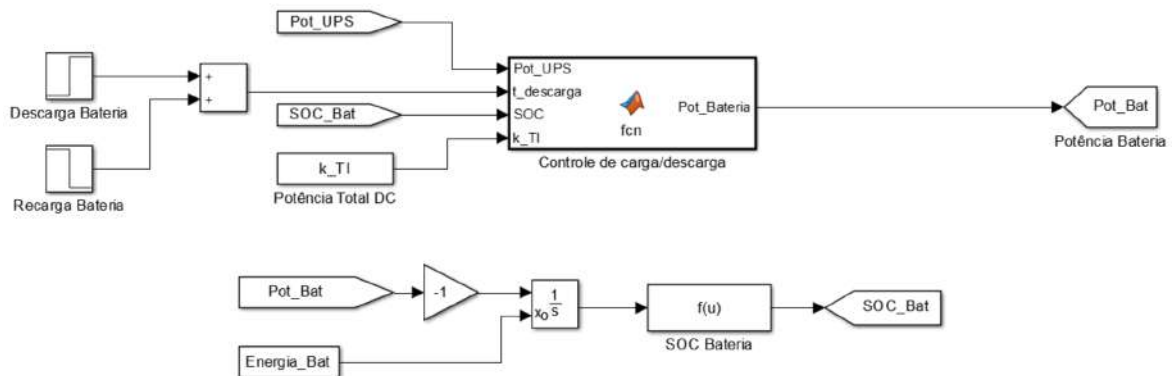
$$E_{tb} = P_{maxDC} \Delta t = P_{maxDC} 900 \quad (26)$$

Em que E_{tb} é a energia total armazenada na bateria, P_{maxDC} é a potência máxima suportada pelo *data center*, definida em projeto e Δt é o tempo em segundos que o *data center* deverá ser suportado pelo UPS. O estado de carga da bateria, então será calculado através da seguinte equação:

$$SOC = \frac{E_{tb} - \int_0^t p_d(t) dt + \int_0^t p_c(t) dt}{E_{tb}} \quad (27)$$

Em que $p_d(t)$ é a potência demandada pela carga no instante t de simulação e p_c é a potência máxima de carregamento da bateria, definido através de suas especificações. Como restrições, o descarregamento só é feito através de um sinal de comando para informar que a bateria deverá ser usada ou não existe energia disponível na entrada do UPS. Além disso, o carregamento da bateria também foi restringido para que só ocorra se não houver descarregamento e até o total de carga da bateria (100% do estado de carga). Desta forma, a modelagem do carregamento/d Descarregamento da bateria e seu estado de carga são apresentados na [Figura 31](#).

Figura 31 – Modelo do carregamento/descarregamento e estado de carga de uma bateria em Matlab ®.

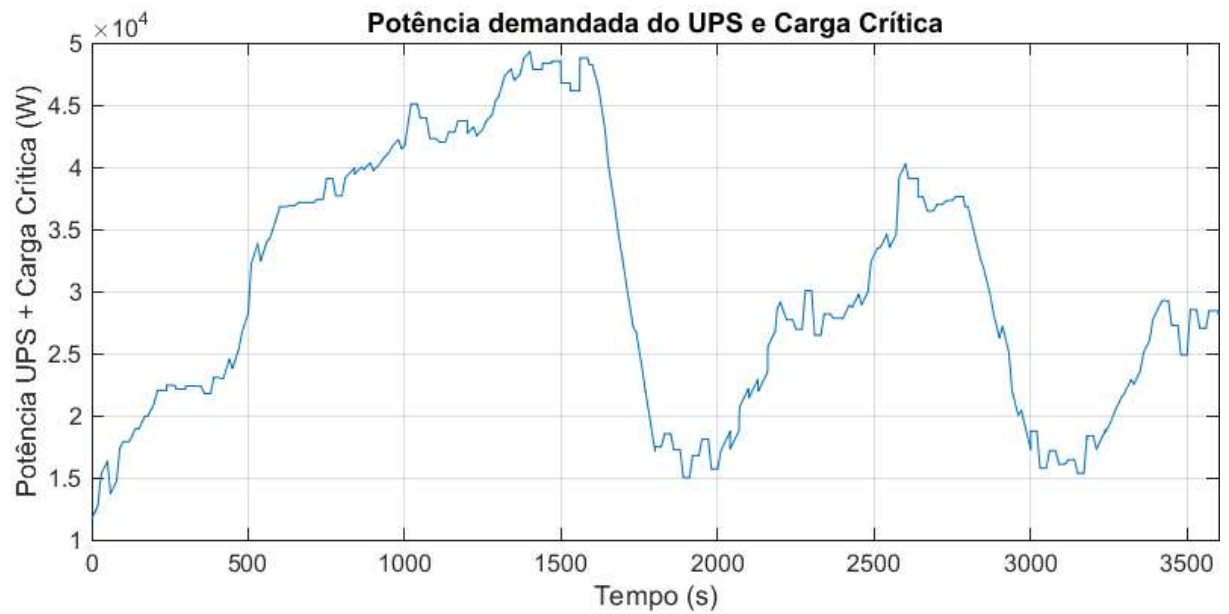


Fonte: Elaboração Própria (2020).

Neste modelo, não foram consideradas características específicas das propriedades da bateria utilizada, por se considerar que estas serão gerenciadas pelo UPS em sua zona linear de carregamento e descarregamento. As características e efeitos de não linearidade, como apresentados por [Brondani \(2015\)](#), são o efeito de recuperação que consistem na reorganização dos elétrons no eletrólito durante intervalos de tempo em que a corrente de descarga é nula, o efeito de taxa de capacidade, que acontece em correntes de descarga altas em que não existe tempo suficiente para a reorganização dos elétrons, e a operação da bateria abaixo do nível de *cutoff*, nível mínimo de capacidade da bateria em que esta não pode gerar tensão suficiente para manter a carga.

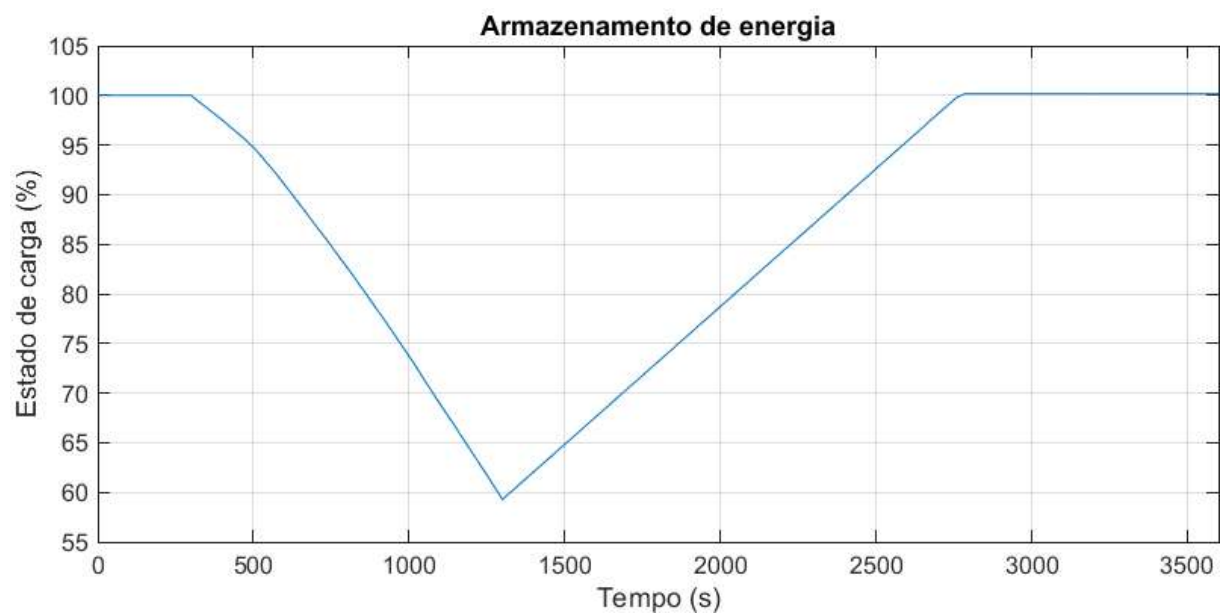
Desta forma, aplicando um perfil de carga à entrada do modelo do UPS e estabelecendo um período de descarga das baterias, é possível obter o estado de carga da bateria e a potência de entrada do UPS, segundo o modelo proposto. A [Figura 32](#) apresenta a potência demandada pelo conjunto UPS e carga crítica configurados na simulação. Na [Figura 33](#), é possível observar o estado de carga do armazenamento de energia quando este é submetido a um tempo de descarga arbitrado de 300 s a 1300 s. Por fim, a [Figura 34](#) apresenta os efeitos do suporte à carga crítica realizado pelo UPS nesse tempo. Pode-se verificar então que, durante o descarregamento do UPS, a rede elétrica não precisa prover energia à carga crítica. No segundo instante, quando o UPS recarrega, a energia que não foi despendida no instante de descarregamento é deslocada, e a rede elétrica precisa supri-lá para que o UPS retorne ao estado de armazenamento de energia completo.

Figura 32 – Simulação do modelo do UPS: perfil de carga imposta ao sistema de UPS.



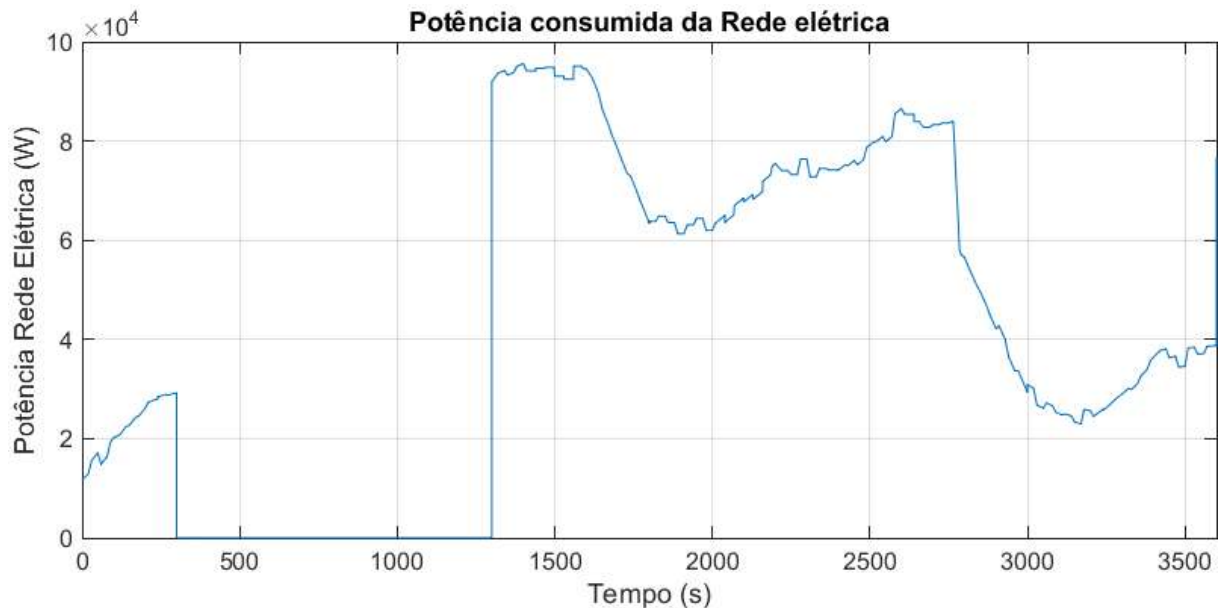
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 33 – Simulação do modelo do UPS: estado da bateria do UPS quando imposto carga.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 34 – Simulação do modelo do UPS: perfil de carga percebido pela rede elétrica durante o descarregamento e carregamento do UPS.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

5.4 Geradores Reserva

Os geradores reserva são responsáveis por assumir a carga em períodos de indisponibilidade prolongada da concessionária de energia. Este subsistema é controlado pela chave de transferência, que tem o papel de detectar a falta de energia e inicializar os geradores. Como os *data centers* trabalham geralmente com um grupo de geradores, dependendo do índice de disponibilidade e classificação Tier que se deseja obter, a chave de transferência também fica responsável por verificar se o grupo moto gerador se encontra em sincronismo para então transferir a carga do *data center*. Quando restabelecido o fornecimento de energia pela concessionária, a chave de transferência volta a transferir a carga para a fonte principal e inicia o processo de desligamento dos geradores.

O funcionamento da chave de transferência pode ser realizado com os seguintes modos de operação, dependendo do modelo:

- a) Transferência por transição aberta: O módulo de controle monitora a rede e quando é detectada falta de energia, o grupo moto gerador tem sua partida comandada. Então, a chave desconecta a carga de rede elétrica e conecta aos geradores quando estes se encontram sincronizados.
- b) Transferência por transição temporizada: O módulo de controle abre a conexão com a fonte primária, e depois de um tempo parametrizável, fecha a conexão

com a fonte secundária. Este modo é aplicado para cargas do tipo indutivas, e o tempo ajustável permite a redução da tensão residual entre conexões.

- c) Transferência por transição fechada: O módulo de controle transfere a carga de uma fonte para outra através de paralelismo momentâneo entre as fontes. Este modo é recomendado à aplicações críticas que não possuem UPS.
- d) Transferência By-Pass: Permite a manutenção da chave de transferência sem a necessidade de desconexão da carga. Os comutadores de transferência nesse modo são conectados em paralelo, acrescentando redundância ao sistema através do comutador secundário de *by-pass* (CUMMINS, 2019).

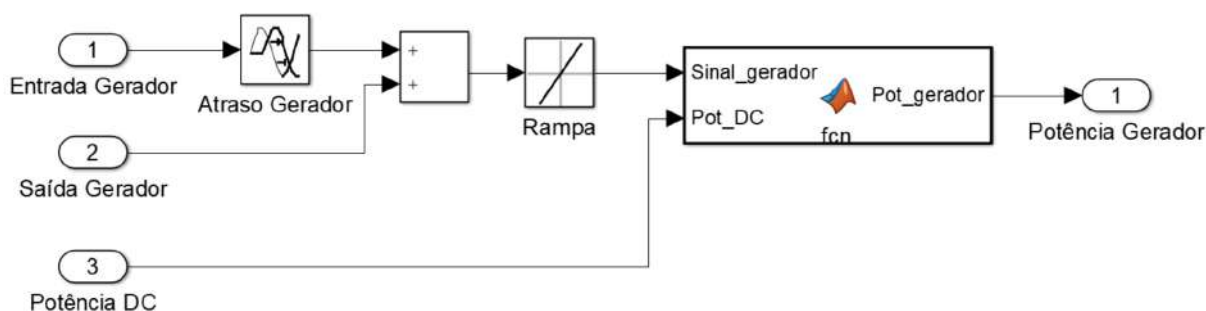
Os *data centers* utilizam o modo de transferência por transição aberta, e o tempo entre a desconexão da rede e a transferência da carga para os geradores depende do estabelecimento de sincronia entre o grupo de geradores. Para a operação em paralelo de mais de um gerador, algumas condições devem ser respeitadas. A primeira condição é que a tensão de todos os geradores deve ser a mesma, para que não haja corrente de circulação entre geradores, que pode causar danos como queima de enrolamentos, superaquecimento e redução da vida útil dos equipamentos. Além desta, os geradores trifásicos precisam ter a mesma sequência de fase, para que não haja curto-circuitos entre barramentos e a mesma frequência, para que a tensão gerada no barramento de conexão entre geradores seja senoidal. O último critério que deve ser atendido é referente ao ângulo de defasagem dos geradores operando em paralelo, para que não haja o surgimento de corrente circulante entre os diferentes geradores (MEGAVOLT ENERGIA, 2010).

Desta forma, o modelo de geração de energia secundária foi concebido como uma fonte de energia, que pode fornecer potência conforme demanda da carga (no caso isolado da rede elétrica), ou potência máxima, mas possui um atraso de inicialização. Este atraso foi estimado em 5 minutos, sendo 3 minutos de espera da chave de transferência para o caso da rede elétrica voltar a se estabelecer e 2 minutos em média para partida do gerador em rampa e estabilização da temperatura. Desta forma, foi estipulado que o grupo moto gerador precisará alcançar potência máxima no período de 2 minutos, e com isso foi possível definir o ângulo da rampa que deverá ser configurado no subsistema. O ângulo da rampa do gerador será calculado como:

$$\theta = \arctan(P_{DC}/T_s) \quad (28)$$

Em que P_{DC} é a carga total projetada para o *data center* e T_s é o tempo de subida, arbitrado em 120 s.

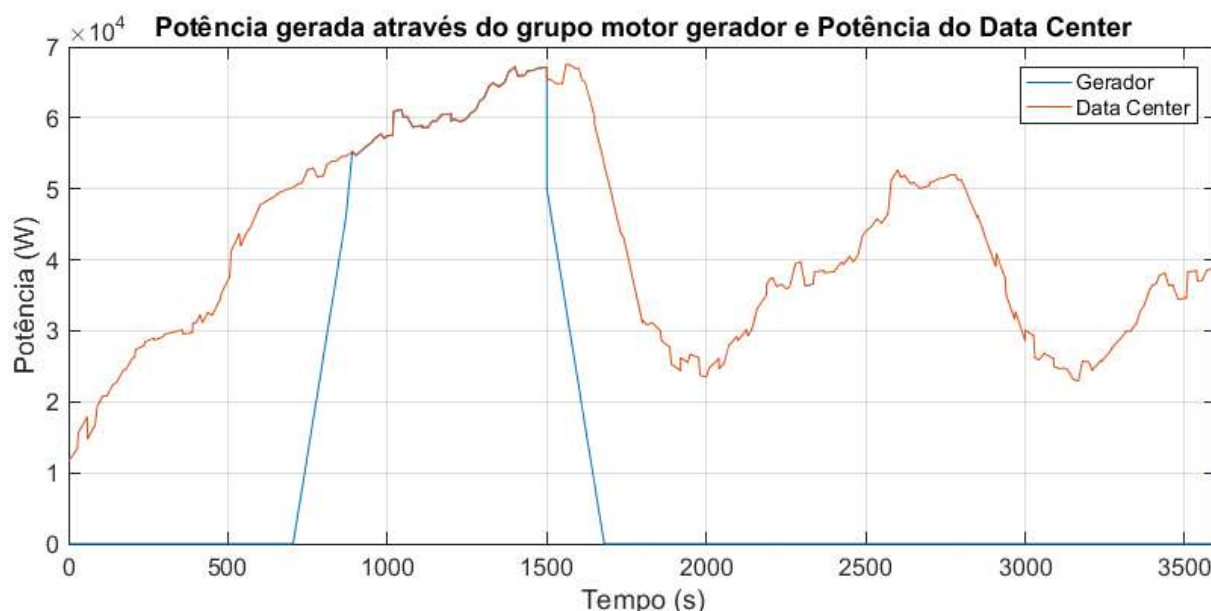
Figura 35 – Modelo do grupo de geradores em Matlab ®.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Na [Figura 35](#), observa-se que o modelo tem como entradas a inicialização e o término de funcionamento do grupo moto gerador que na sua operação real é comandada pela chave estática. Além disso, o modelo tem como entrada a potência total do *data center*, que será a potência suprida pelos geradores quando a carga é transferida. Para simulações de cenários em que o gerador trabalha conectado a rede elétrica, a referência utilizada será a potência nominal do grupo. Além disso, foi implementado um atraso para a entrada de operação.

Figura 36 – Simulação do modelo do grupo moto gerador quando aplicado um perfil de carga e um comando de partida.



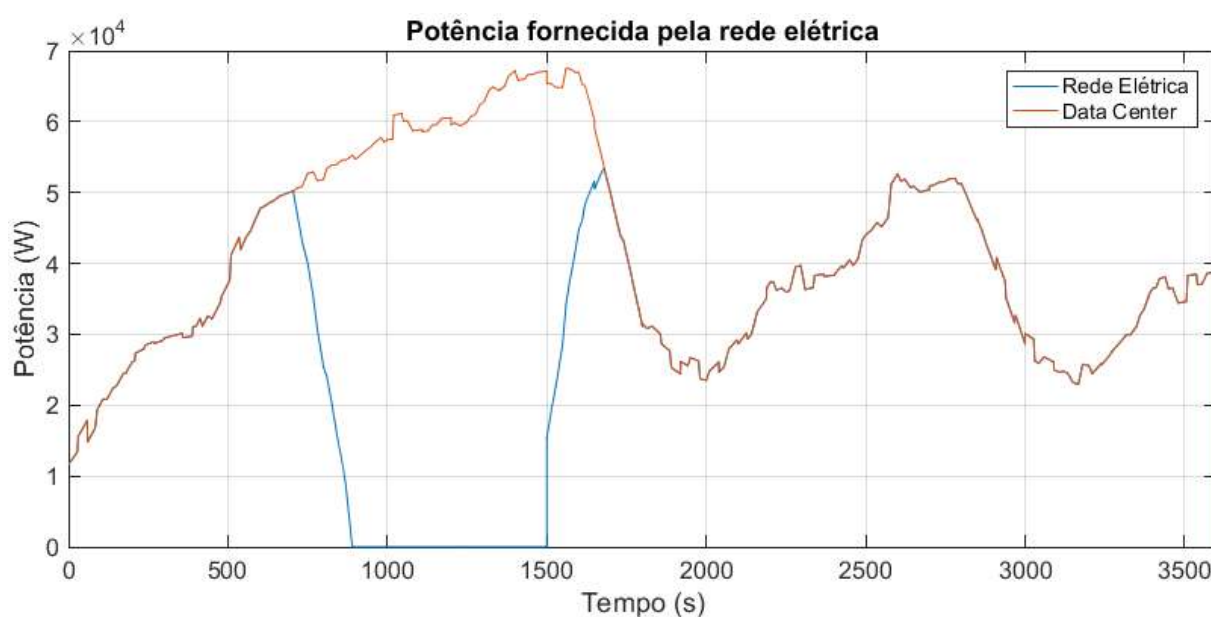
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Na [Figura 36](#), é possível verificar que, mesmo o comando de entrada do grupo tenha sido estipulado para 600 s, a transferência da carga apenas começará no momento 720 s. Também é possível observar que a transferência de carga é

realizada de forma gradual em rampa, e a demanda do *data center* só é completamente transferida no instante 891 s. Caso o *data center* estivesse demandando potência máxima, esta transferência só seria completada no instante 900 s, respeitando o tempo de entrada modelado para o grupo de geradores. Este intervalo, na simulação completa, terá sua energia suprida pelo sistema de UPS.

A [Figura 37](#) apresenta a potência demandada da rede elétrica, que durante o tempo de funcionamento de gerador, será nula. Do ponto de vista da rede elétrica, a carga é totalmente desconectada, e a rede não provê mais energia para o sistema.

Figura 37 – Simulação do modelo do grupo moto gerador apresentada da perspectiva da rede elétrica.

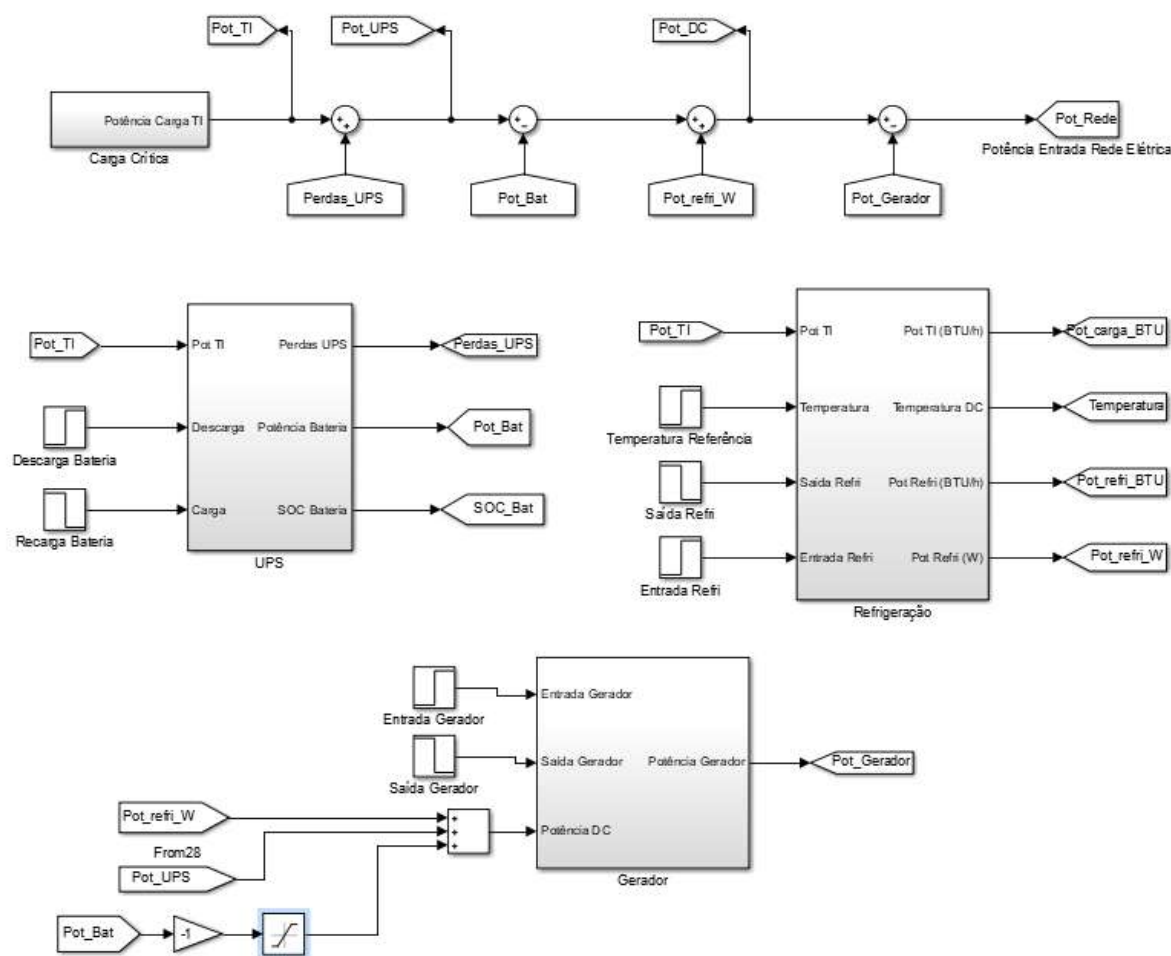


Fonte: Elaboração Própria (2020).

5.5 Sistema completo

Com os subsistemas que compõe um *data center* modelados, pode-se então modelar o sistema completo e suas conexões. Este modelo consiste na carga crítica que impõe uma potência ao sistema de UPS e de refrigeração. O sistema de UPS pode prover energia ou impor sua potência à fonte ou ao grupo moto gerador, em conjunto com a potência despendida no sistema de refrigeração. Este conjunto então é suprido pela rede ou pelo grupo de geradores, dependendo de sua disponibilidade. O modelo geral pode ser visualizado na [Figura 38](#).

Figura 38 – Modelo geral do *data center* e suas conexões.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Para validação do modelo geral, a simulação da operação do *data center* em condições normais e falta de energia será apresentada nas [Figura 39](#) e [Figura 40](#). Nessa simulação, deve ser apresentado que a potência da carga crítica, a potência dissipada no UPS e a potência despendida com o sistema de refrigeração serão observados na potência injetada pela rede elétrica. No momento de falta de energia, o UPS deverá assumir a potência da carga crítica enquanto o grupo moto gerador é iniciado. O sistema de refrigeração, durante o intervalo de inicialização do grupo de geradores, deverá permanecer desligado. No estabelecimento do grupo de geradores como fonte de energia, o UPS deverá parar de prover energia e recarregar suas baterias. O sistema de refrigeração deverá ser religado e estabilizar a temperatura.

Figura 39 – Simulação geral do *data center*: subsistemas de carga de TI e UPS. Funcionamento em um cenário de queda de energia e restabelecimento.

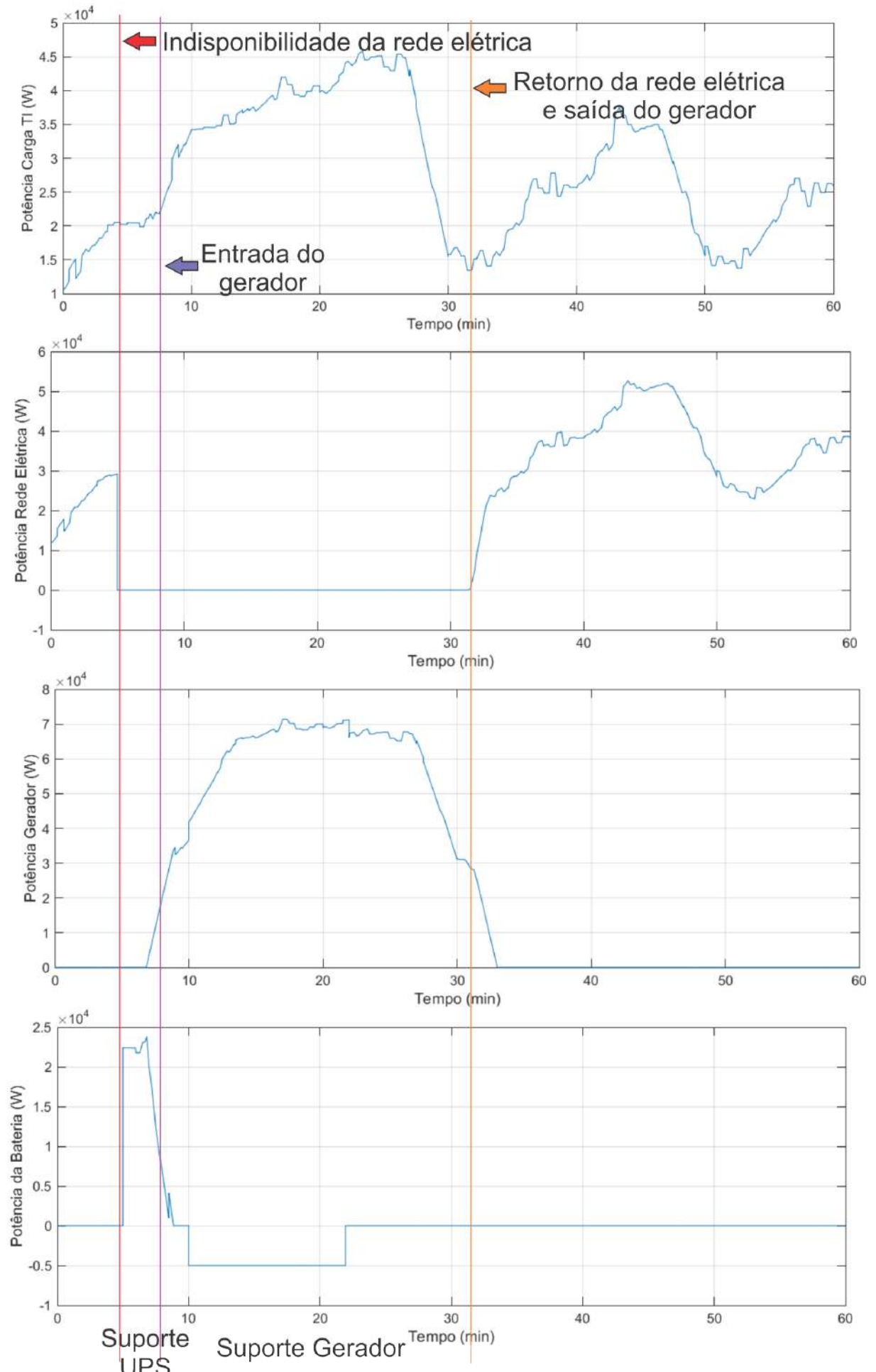
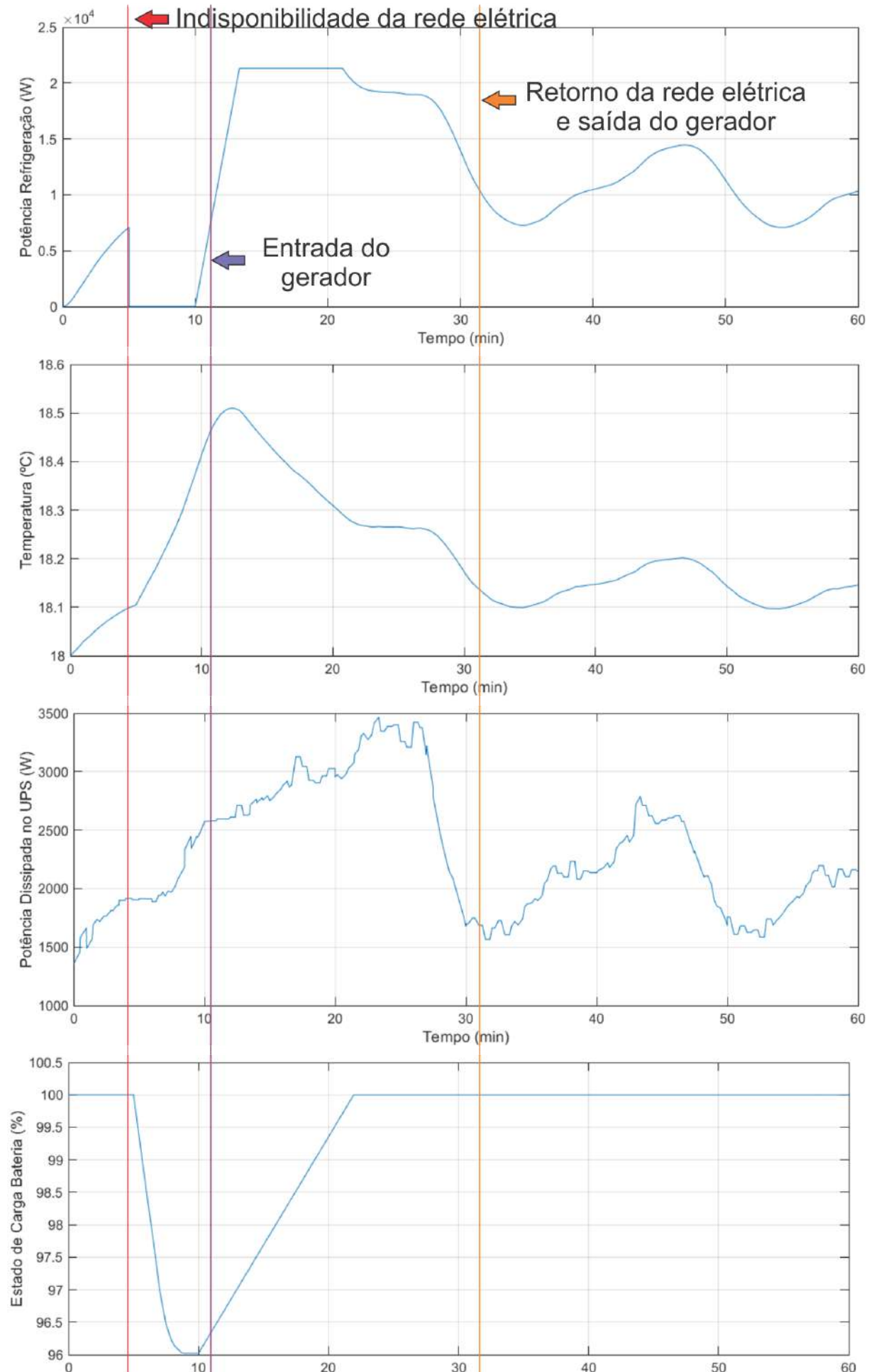


Figura 40 – Simulação geral do *data center*: subsistemas de refrigeração e geradores. Funcionamento em um cenário de queda de energia e restabelecimento.



Foram arbitrados os valores de 50 kW para a potência máxima da carga de TI, ausência da rede elétrica em 300 s de simulação e restabelecimento da rede em 1800 s. Nesta simulação, foi possível verificar que o funcionamento do *data center* simulado está condizente com a realidade. Também foi possível observar o comportamento dos diferentes subsistemas durante a operação normal e queda de energia.

5.6 Conclusão

Neste capítulo, os subsistemas carga crítica de TI, refrigeração, UPS e baterias reserva e grupo moto gerador foram modelados com o objetivo de verificar a interação dos componentes de um *data center*. Visando analisar os diferentes cenários identificados no [Capítulo 4](#) de possíveis contribuições de *data centers* a resiliência da *smart grid*, o fluxo de potência de um *data center* foi mapeado.

Para isso, foi adotado como variável independente do modelo a carga crítica, concebida como um sinal de dinâmica lenta arbitrado, e um sinal de dinâmica rápida. A variação deste sinal foi adotada nos limites de 0 a 1, e então multiplicada pela carga projetada do *data center*, que irá depender do cenário estipulado no estudo de caso que será verificado.

Esta carga impõe uma potência no ambiente que é dissipada na forma de calor, e deve ser retirado pelo sistema de refrigeração. Dessa forma, o sistema de refrigeração foi modelado com o objetivo de identificar como a potência injetada pela carga crítica afeta a temperatura do ambiente. Para isso, foi considerado o sistema como isolado termicamente e com um volume invariável. Através do modelo térmico desenvolvido, foi adicionado uma dinâmica de controle da temperatura, adequado a ambiente de *data center*. Através desse modelo, foi possível identificar a potência necessária dissipada pelo sistema de refrigeração.

A carga crítica também impõe uma potência que deve ser suprida pelo sistema de UPS. Esse sistema, responsável por manter a carga crítica em períodos de ausência de fornecimento de energia, foi modelada em duas etapas. A primeira etapa modelada diz respeito ao funcionamento do UPS quando há energia de entrada. Nesta etapa, foi considerada as perdas de energia no UPS, provenientes de sua eficiência com relação as conversões de energia realizadas pelo equipamento. A segunda etapa modelada diz respeito ao funcionamento do UPS sem energia de entrada. Nesta, a energia fornecida pelo UPS é proveniente de seu armazenamento de energia, e para isso foram considerados o descarregamento da bateria e seu estado de carga. No restabelecimento da energia de entrada, foi modelado o carregamento das baterias, e a potência necessária para este processo. Não foram considerados, no entanto, não linearidades do processo de carregamento e descarregamento de baterias, visto que

este processo é gerenciado pelo UPS e as estratégias de carregamento são proprietárias de cada fabricante.

Toda a carga do *data center*, então, é imposta à rede elétrica, quando esta está disponível, ou ao grupo de geradores reserva, que são acionados na ausência de fornecimento de energia pela concessionária. Para o modelo deste sistema, foi considerado que este possui um tempo de sincronismo até assumir a carga do *data center*. Durante este período, a carga crítica é sustentada pela energia armazenada no UPS e o sistema de refrigeração permanece desligado. Além disso, duas possibilidades de funcionamento do grupo moto gerador foram consideradas, o funcionamento ilhado e o funcionamento conectado à rede elétrica. No funcionamento ilhado, o grupo moto gerador fornece somente a potência requisitada pelo *data center*. No funcionamento conectado, o grupo gerador pode fornecer sua potência máxima, que será injetada na rede.

Por fim, os diversos subsistemas modelados foram simulados em conjunto em um cenário típico de *data centers*, e para qual a arquitetura elétrica destes ambientes é planejada, que é a operação ininterrupta do *data center* mesmo com a ausência de energia de fornecimento da rede elétrica. Neste cenário, os resultados foram analisados e verificou-se que estes são condizentes com a realidade de operação do sistema completo.

6 ESTUDO DE CASO

Com os modelos obtidos no [Capítulo 5](#), cenários mapeados para auxílio da resiliência da *smart grid* serão simulados e analisados. Estes cenários foram estipulados através da [Tabela 3](#) e serão apresentados os resultados das simulações realizadas de acordo com os cenários propostos.

Para o estudo de caso, o *data center* utilizado terá as seguintes características:

- a) Potência da carga crítica máxima projetada: 50 kW;
- b) Energia armazenada no UPS: 25 kWh (energia para suportar a carga máxima do *data center* por 30 minutos);
- c) Eficiência da Refrigeração (EER - *Energy Efficient Ratio*): 8 (BTU/h)/W ([SILVA, 2010](#));
- d) Volume de controle do *data center*: 20 m³;
- e) Temperatura de referência: 20 °C;
- f) Tempo de entrada do gerador: 180 s de sincronização e entrada em rampa de 120s para carga máxima; e
- g) Potência máxima do *data center*: 100 kW.

Estes valores representam um *data center* pequeno, com uma densidade alta de energia por *rack* ([ANDREA, 2014](#)). Este tipo de ambiente é comum em empresas de pequeno e médio porte, que possuem gerenciamento interno de TI e um espaço para até quatro *racks* de servidores e equipamentos de rede. Ainda assim, os modelos poderiam ser empregados em *data centers* de diferentes tamanhos, não havendo restrições para os mesmos. Isso porque os modelos foram construídos considerando os parâmetros principais do *data center* como variáveis de entrada, e proporcionando resultados de saída condizentes às condições do ambiente impostas.

Os cenários apresentados serão de corte de carga parcial, desligando a carga crítica (que será alimentada pelo UPS) no primeiro cenário e a refrigeração no segundo cenário; modulação de carga através da utilização da energia armazenada no sistema de UPS e, separadamente, a energia armazenada em forma de calor para o sistema de refrigeração; e o fornecimento de energia, com a operação do UPS e do grupo moto gerador conectados à rede elétrica.

Não será analisado a modulação de carga através do gerenciamento da carga crítica, pois esta será a variável independente. Este grau de liberdade é possível e foi estudado em [Parolini et al. \(2012\)](#). Contudo, as variáveis para a manipulação da carga crítica e sua influência não serão tratados no escopo deste trabalho.

Através dessas simulações, deseja-se obter os efeitos desta operação na rede elétrica e as figuras de mérito importantes para a análise destas condições de operação, com o intuito de inserir estes monitoramentos em uma ferramenta de gerenciamento de infraestrutura de *data centers* (DCIM).

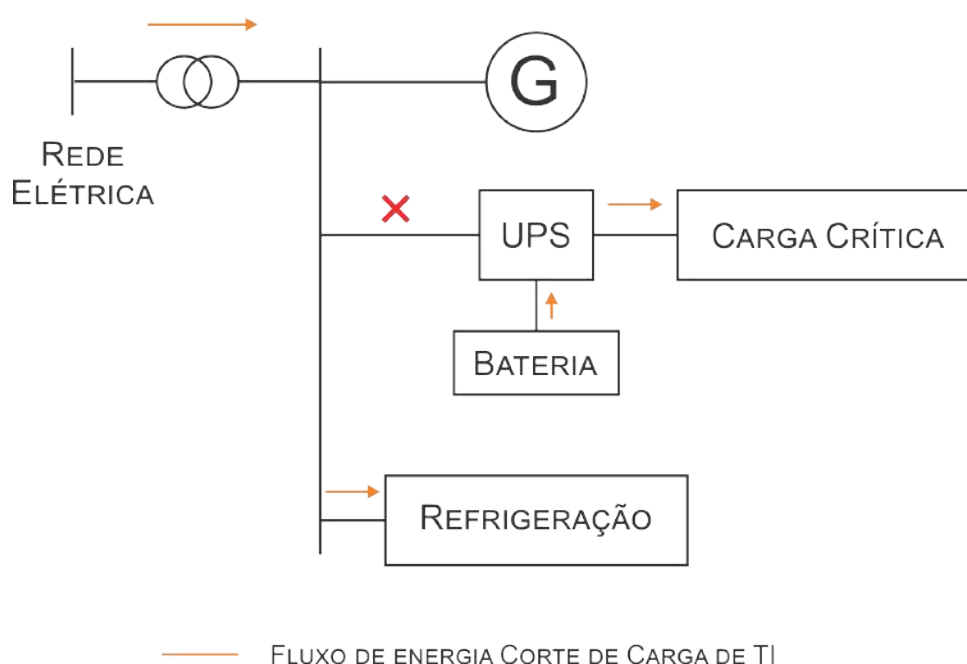
6.1 Corte de carga parcial

Os cenários a seguir serão simulados considerando o corte parcial da carga de um *data center*. Nestes cenários, a carga crítica de TI pode operar isoladamente através da alimentação do sistema de UPS e não demandar potência da rede elétrica por um período específico de tempo. Além desta, a refrigeração também possui liberdade para ser desligada a fim de atenuar a potência demanda da rede, visto que o *data center* pode operar em um intervalo de temperatura, que pela recomendação da NBR 14565 da [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#) é de 18 °C e 27 °C.

6.1.1 Carga crítica

Para a simulação de corte de carga parcial, com desconexão da carga de TI, a estratégia utilizada será de manter a carga de TI apenas com a energia armazenada no UPS. Dessa forma, a rede elétrica irá sustentar apenas o sistema de refrigeração, não sendo neste exemplo iniciado o grupo moto gerador. O fluxo de energia que representa o cenário proposto é representado pela [Figura 41](#).

Figura 41 – Representação do fluxo de energia para o cenário de corte de carga de TI.



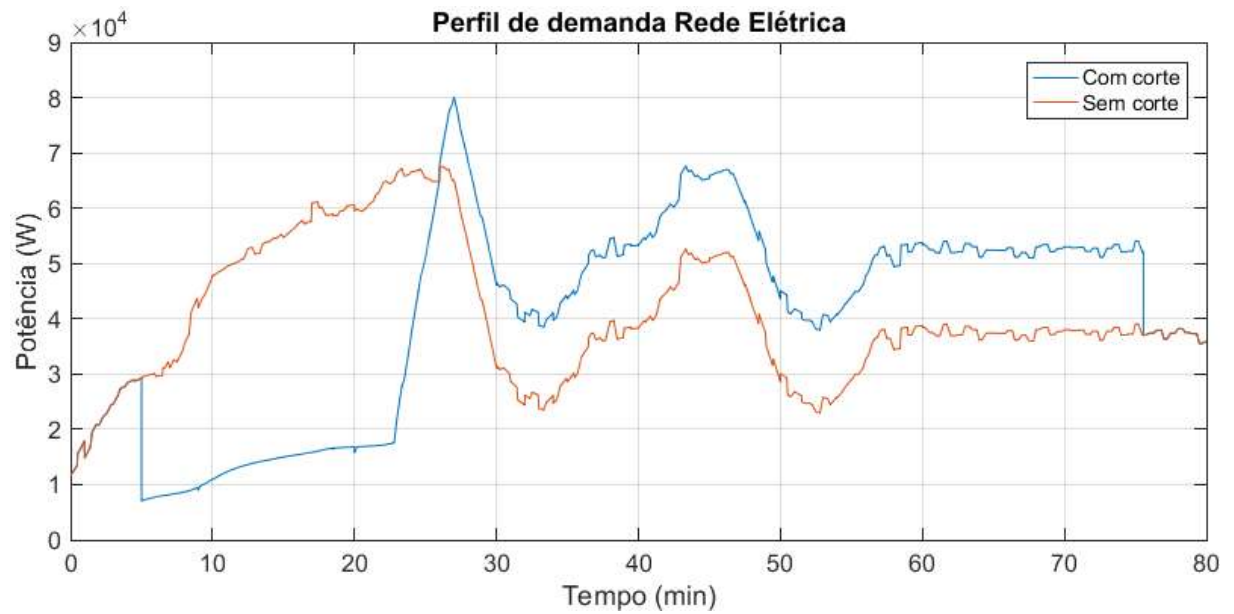
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Foi estipulado o tempo de saída da carga de TI em 300 s de simulação e seu retorno à rede elétrica no momento em que o estado de carga do UPS for de 50%. Como, neste estudo de caso, o armazenamento de energia está estimado em duas vezes o recomendado pela [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#), o UPS ainda manterá a energia para sustentar a carga de TI por 15 minutos, sem acrescentar riscos a disponibilidade do *data center*.

Para comparação, será apresentada a potência demandada da rede elétrica sem e com o corte parcial de carga. Os resultados serão analisados através deste comparativo.

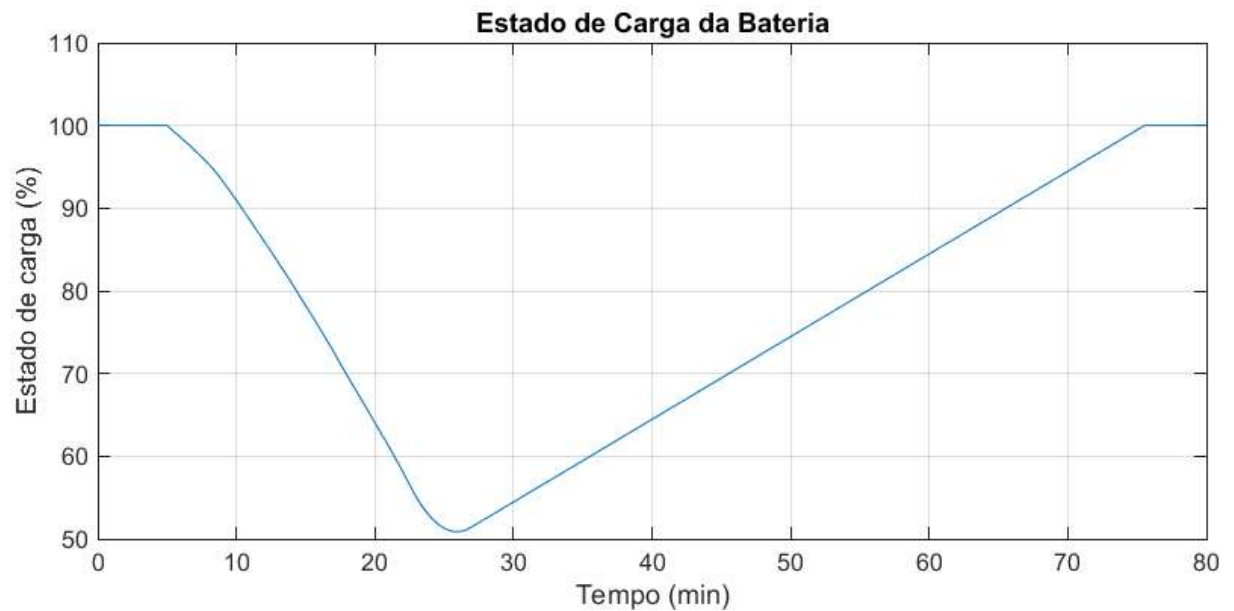
A [Figura 42](#) apresenta a potência demandada do *data center* à rede elétrica nos cenários com e sem corte de carga de TI. É possível verificar, neste gráfico, que a carga de TI é cortada no instante 300 s e retorna no instante 1470 s, momento em que o estado de carga da bateria é de 50%, [Figura 43](#). Na [Figura 44](#) é possível visualizar a potência fornecida pelo UPS durante o seu descarregamento e a potência consumida durante o período de carregamento.

Figura 42 – Perfil de demanda do *data center* visto do ponto de vista da rede elétrica nas simulações com e sem corte de carga de TI.



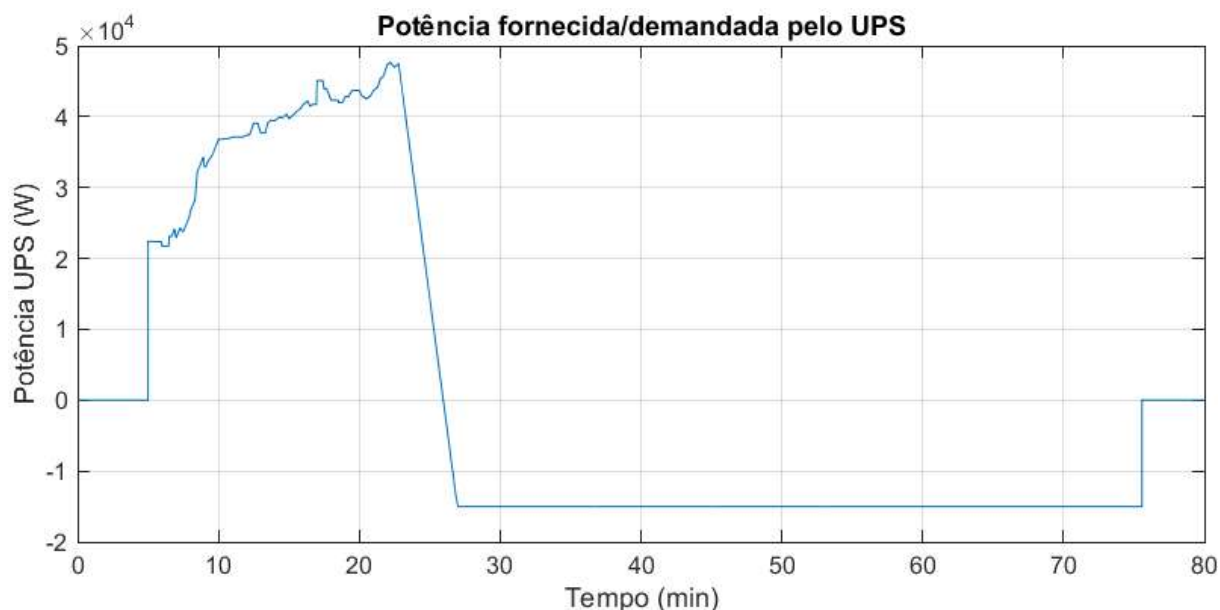
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 43 – Estado de carga da bateria durante o corte de carga de TI.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

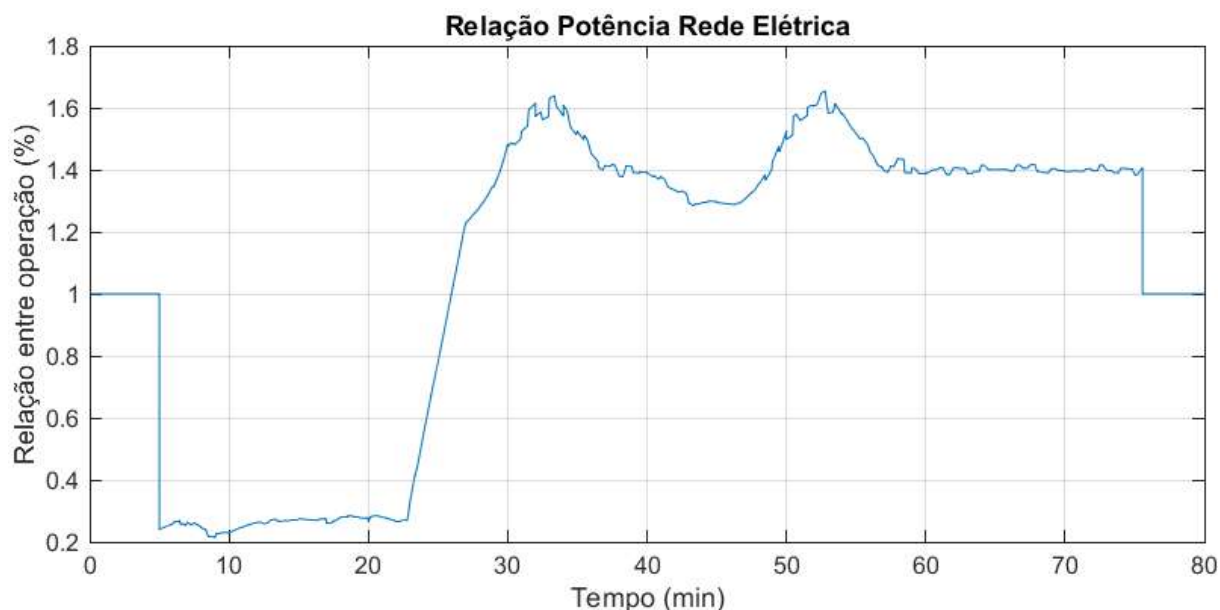
Figura 44 – Perfil de potência do UPS durante o corte de carga de TI nos períodos de fornecimento e consumo de energia.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

A [Figura 45](#) mostra a alteração de carga de maneira percentual, relacionando o perfil de carga com corte de carga de TI ao perfil de carga sem corte de TI. Esse resultado mostra que no momento de corte de carga, foi possível reduzir em média 74% da demanda da rede elétrica, mas no momento posterior a esse corte, a demanda da rede elétrica foi superior em uma média de 41 %. No momento de carregamento das baterias, é possível controlar a carga que será adicionada a rede elétrica através da potência de carregamento das baterias. Aumentando o tempo de carregamento, é possível não sobrecarregar a rede, durante o período posterior ao corte de carga.

Figura 45 – Relação da potência demanda da rede elétrica entre cenários com e sem corte da carga crítica.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Com essa simulação, é possível verificar que utilizando o armazenamento de energia do UPS, o *data center* possui a liberdade de deslocar a demanda de potência, dentro de certos limites que dependerão principalmente da capacidade das baterias instaladas no UPS. Ainda, é possível observar um aumento do fator de pico da demanda do *data center*, como apresentado na [Figura 42](#). Como resultado, pode-se verificar que é uma estratégia válida para atenuar a demanda da rede elétrica por um tempo na ordem de minutos, o que pode ser utilizado para aumentar a resiliência da rede inteligente em casos excepcionais de equilíbrio da geração e demanda. Como consequência, a rede elétrica é exigida posteriormente, e a estratégia traz efeitos no dimensionamento da rede elétrica que atende o *data center*, devido ao aumento do fator de pico quando este operar com corte de carga. Esta carga adicional, no período de carregamento, pode ser manipulada para não atingir limites de dimensionamento da rede elétrica, através do aumento do tempo de carregamento das baterias do UPS.

Pela simulação, também foi possível observar que o tempo de suporte do UPS irá depender da dinâmica da carga de TI, e em momentos de menor exigência de carga de TI, este desligamento poderá se prolongar mais. Como o armazenamento de energia foi estipulado a 30 minutos de carga máxima, quanto menor a potência requerida da carga de TI em relação a carga máxima, mais tempo o UPS poderá manter a carga crítica sem interferir na disponibilidade do *data center*. Além disso, o percentual de carga removido durante o corte parcial percebido pela rede elétrica dependerá diretamente da eficiência dos sistemas auxiliares, com destaque ao sistema de refrigeração. *Data Centers* com sistema de suporte menos eficientes (e por

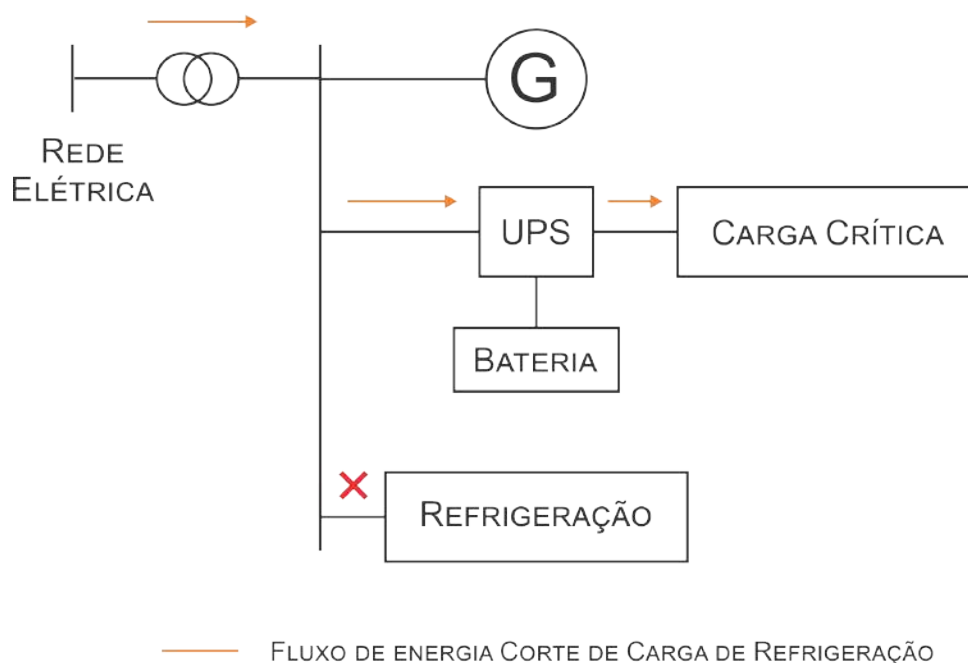
consequência, PUE maior), não terão tanto ganho com o desligamento apenas da carga de TI, visto que esta representará um percentual menor do total da carga do sistema.

6.1.2 Refrigeração

O cenário que será simulado nesta seção diz respeito ao corte parcial da carga de refrigeração. Os *data centers* gastam grande parte de sua energia no sistema de resfriamento de ar, que pode chegar a 50% da carga total, para que seja removido o calor gerado pela carga de TI e UPS das instalações, visando que estes trabalhem na temperatura recomendada para melhor funcionamento.

Segundo as recomendações da [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#), a temperatura interna de um *data center* deverá permanecer entre 18 °C e 27 °C. Devido a esse grau de liberdade, o sistema de refrigeração torna-se candidato a contribuir para a rede elétrica em termos de diminuir a potência consumida pelo *data center*, quando a rede estiver sobrecarregada. O fluxo de energia deste cenário foi ilustrado na [Figura 46](#).

Figura 46 – Representação do fluxo de energia para o cenário corte de carga de refrigeração.



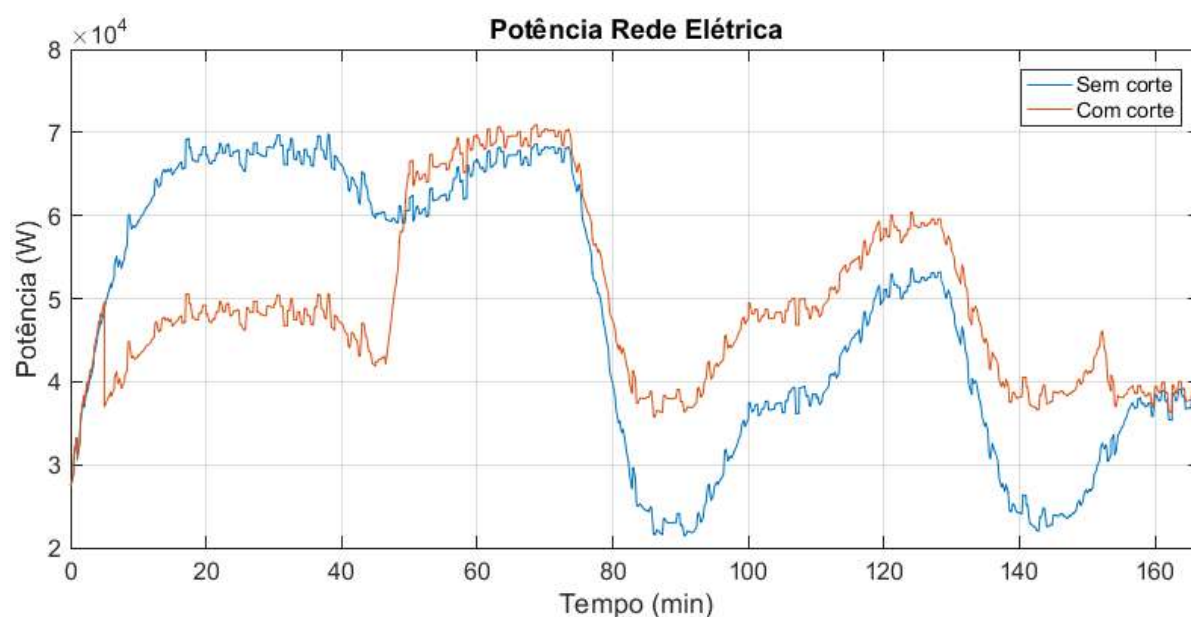
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Dessa forma, o cenário foi arbitrado para desligar a carga de refrigeração no instante 300 s de simulação e religá-la quando a temperatura alcançar 25 °C. Neste cenário, a temperatura inicial é de 20 °C, ainda que muitos *data centers* operem em temperaturas mais baixas, devido a pontos de calor não gerenciados, por causa da

ausência de monitoramento dessa grandeza. Foi estabelecido que a temperatura limite seria 25 °C para que exista uma margem de 2 °C de folga, no caso de uma falta de rede elétrica e a necessidade de o *data center* ser mantido pelo sistema de UPS, enquanto o gerador é iniciado. Devido a dinâmica da temperatura ser mais lenta, foi estipulada uma simulação de 10000 s, e o perfil de carga de TI foi ajustado.

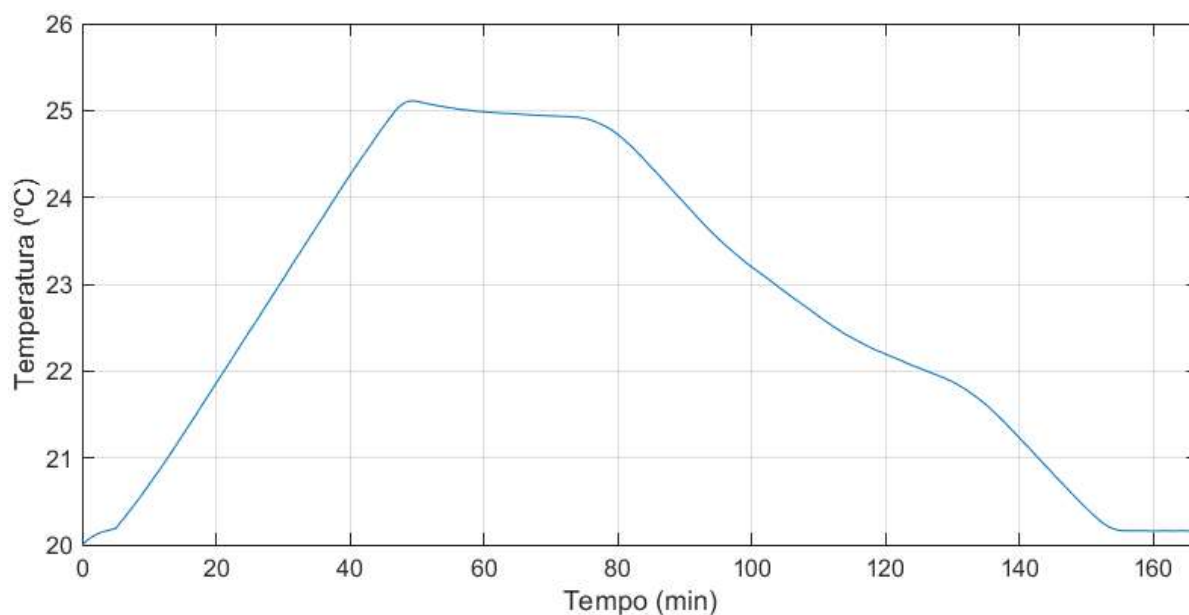
Dessa forma, a [Figura 47](#) demonstra o perfil de carga da perspectiva da rede elétrica para os cenários com corte de carga de refrigeração e operação normal. É possível verificar que a refrigeração é desligada a 300 s de simulação e volta a ser religada a 2997 s, quando a temperatura chega as 25 °C, apresentado na [Figura 48](#). A [Figura 49](#) apresenta a potência demandada pelo sistema de refrigeração, que quando é religado mantém potência máxima de resfriamento até o instante 9120 devido a atuação da estratégia de controle, quando a temperatura é finalmente estabilizada para o patamar da temperatura de referência, de 20 °C.

Figura 47 – Perfil de demanda do *data center* do ponto de vista da rede elétrica nas simulações com e sem corte de carga de refrigeração.



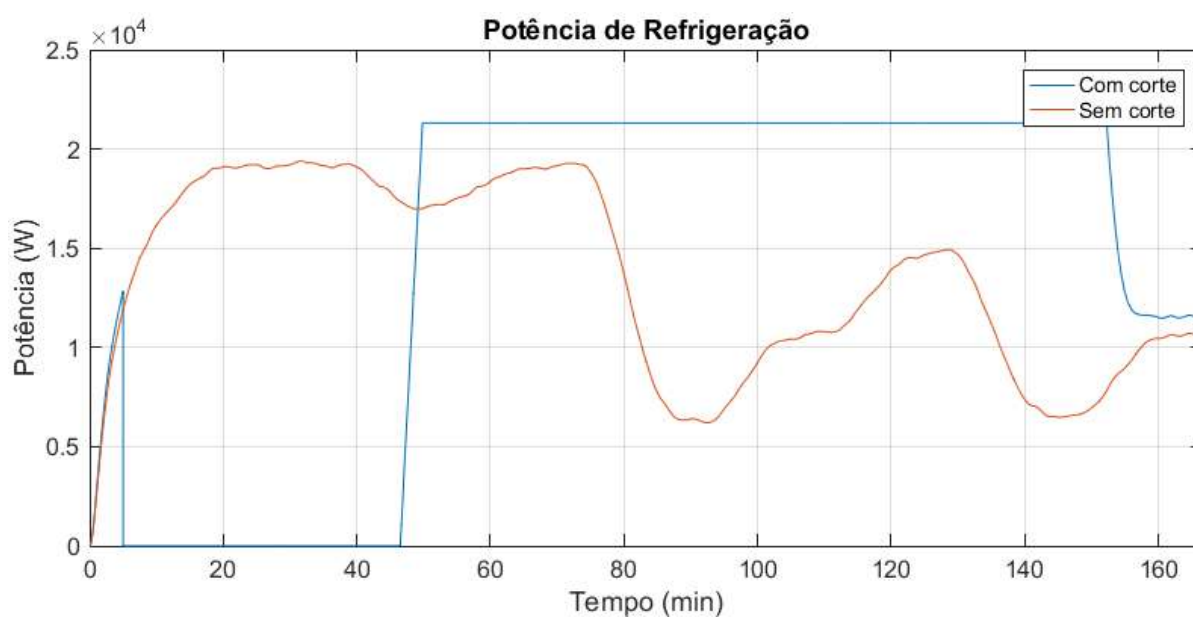
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 48 – Evolução da temperatura durante o corte de carga de refrigeração.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

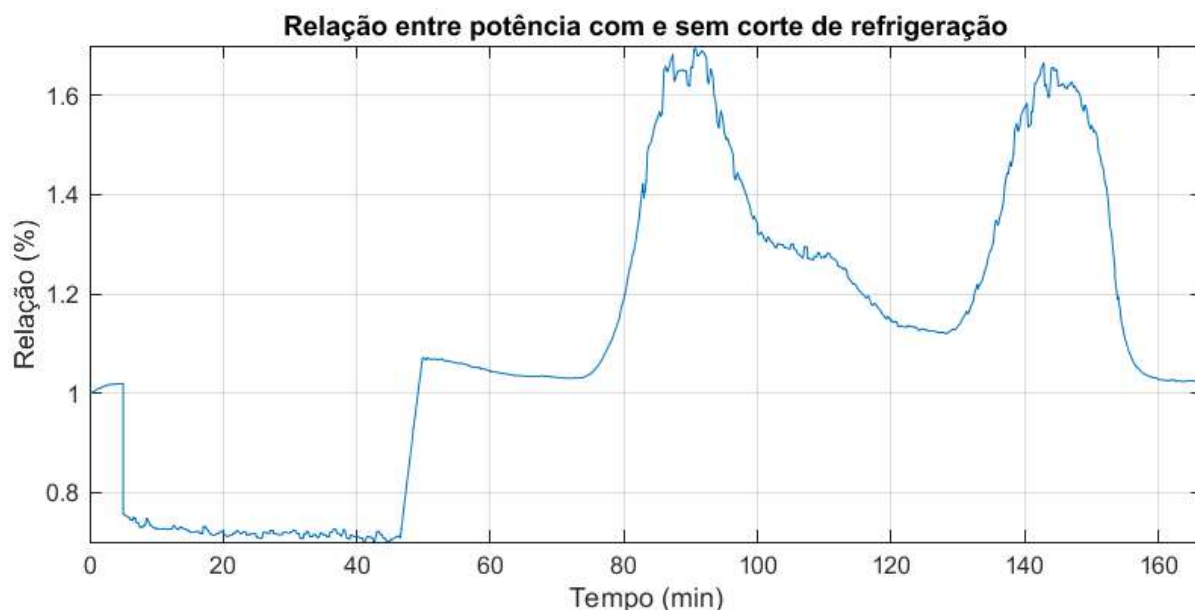
Figura 49 – Potência demandada pela refrigeração durante o cenário de corte de carga.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

A [Figura 50](#) mostra a relação entre o perfil de carga percebido pela rede elétrica com e sem o corte do sistema de refrigeração. É possível verificar através deste gráfico que a potência deste sistema é deslocada no tempo, demandando mais energia no momento em que o sistema é reativado.

Figura 50 – Relação entre potência demandada da rede elétrica nos cenários com e sem corte de carga crítica.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

O cenário simulado mostra, então, que o auxílio da refrigeração na estabilidade da rede elétrica é possível, mas possui diferenças com relação ao corte de carga de TI apresentado anteriormente. Para diminuição da carga por períodos maiores, com duração maior de 15 minutos, esta estratégia é mais indicada, contudo não é tão efetiva quanto à anterior. Foi possível observar uma diminuição maior que 20% da carga, o que não é tão expressiva quanto a carga de TI para o cenário proposto. Contudo, as características do *data center*, como eficiência do sistema de refrigeração, possuem grande influência na magnitude do auxílio que o corte de refrigeração pode trazer para a rede elétrica, fazendo equipamentos menos eficientes mais expressivos. Além disso, como a saturação do esforço da refrigeração é menos flexível quanto a potência de recarga das baterias, essa abordagem também se torna menos flexível com relação ao efeito contrário proporcionado a rede quando a refrigeração é ligada novamente.

6.2 Modulação da carga

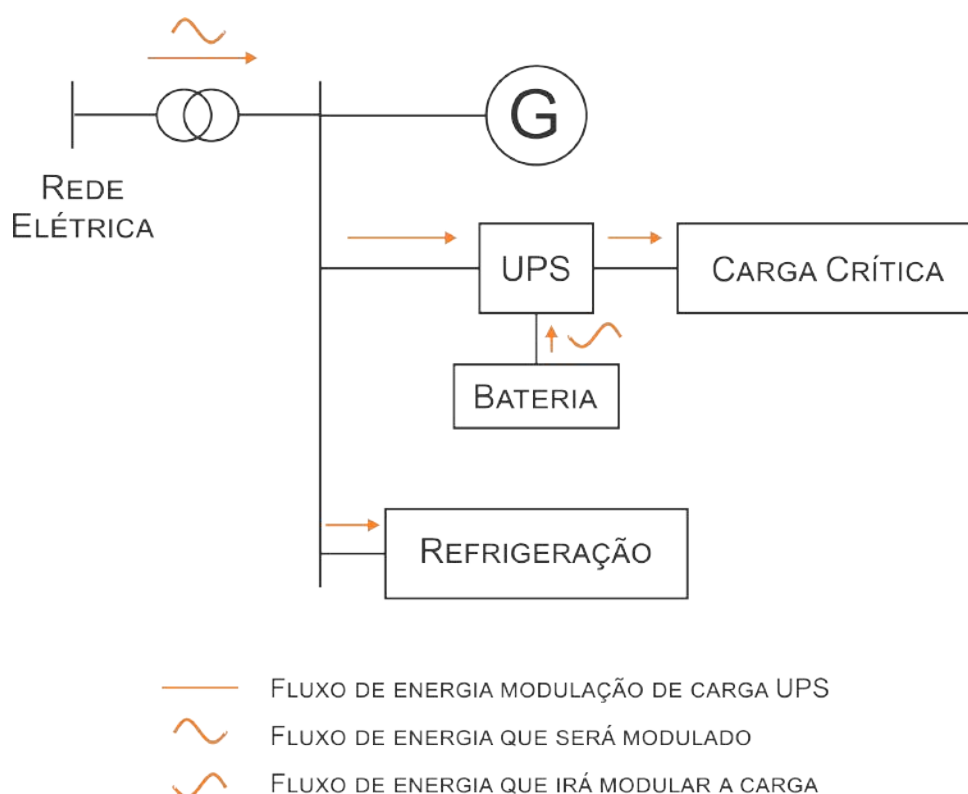
A modulação de carga é uma estratégia utilizada para suavizar a dinâmica da carga em relação àquela percebida pela rede elétrica. Nos cenários a seguir, serão simuladas a modulação de carga com auxílio do UPS, fornecendo ou consumindo energia das baterias, e com o auxílio da refrigeração, que neste caso não fornece energia mas poderá deixar de consumir devido à flexibilidade permitida pelo intervalo de

temperatura recomendado para *data centers*. O objetivo desta estratégia será manter a carga do *data center* em uma referência, diminuindo picos e vales de energia.

6.2.1 UPS

Para a simulação da modulação de carga com auxílio do sistema de UPS, será considerado que as baterias deverão fornecer ou consumir a diferença de energia entre a referência arbitrada e a potência consumida pelo *data center*, representado pelo fluxo de energia mostrado na [Figura 51](#).

Figura 51 – Representação do fluxo de energia para o cenário de modulação de carga pelo UPS.



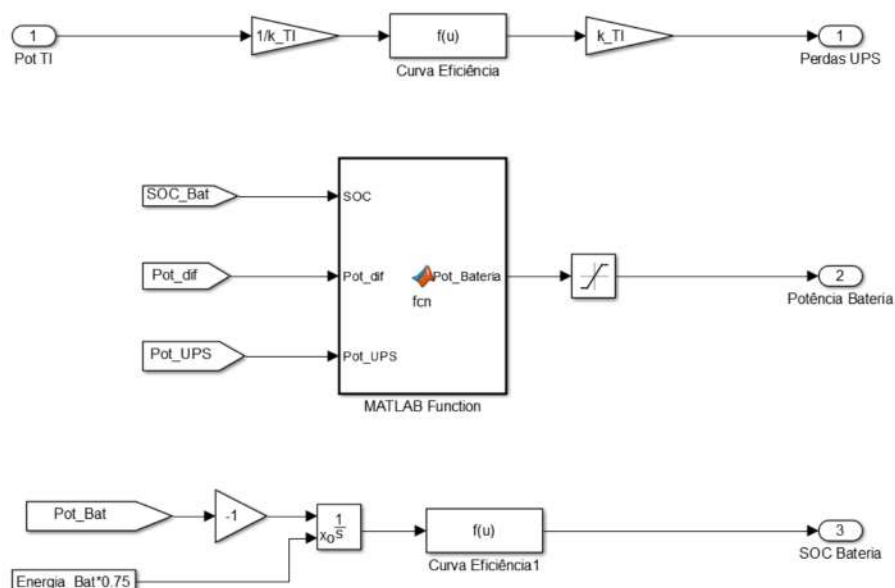
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Para este estudo de caso, a liberdade de modulação da carga está atrelado ao estado de carga das baterias, e seus limites máximo e mínimos são restrições do sistema. Por esse motivo, foi definido que a bateria iniciaria com o estado de carga de 75% do total de armazenamento, sendo que não poderá ser maior que 100% de carga (restrição física da bateria) e menor que 50% de carga (devido a recomendação da [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#) de assegurar que exista energia armazenada nas baterias para manter o *data center* por 15 minutos).

Como restrição de fornecimento de potência, as baterias não poderão fornecer energia superior a potência demanda pelo UPS. Neste cenário, não foi

considerado um sistema de UPS com capacidade de fornecer energia à rede. Esta situação será avaliada na [subseção 6.3.1](#). Além desta, o fornecimento e consumo de energia pelo UPS foi restringido a potência máxima de projeto da carga do *data center*, visto que a aquisição de um UPS em fase de projeto é pautada por este requisito. O novo modelo do sistema de UPS para o funcionamento em modulação de carga é apresentado na [Figura 52](#).

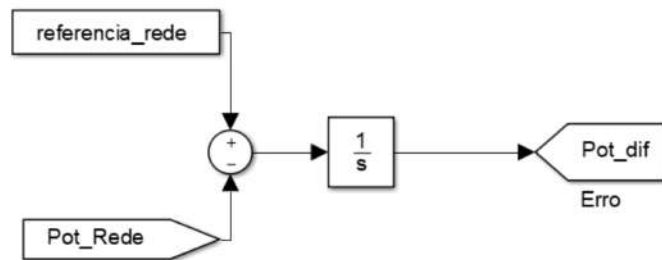
Figura 52 – Modelo do UPS em operação para auxílio à modulação de carga.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Para que a carga do *data center* siga uma referência com relação a carga demanda, foi estipulada uma potência constante de referência que para a simulação será de 40 kW, mas pode ser adaptado a cada cenário escolhido de forma fácil, devido ao modelo proposto. A diferença entre a referência e a carga da rede elétrica, então, foi integrada objetivando conseguir erro nulo em regime permanente, como apresentado na [Figura 53](#).

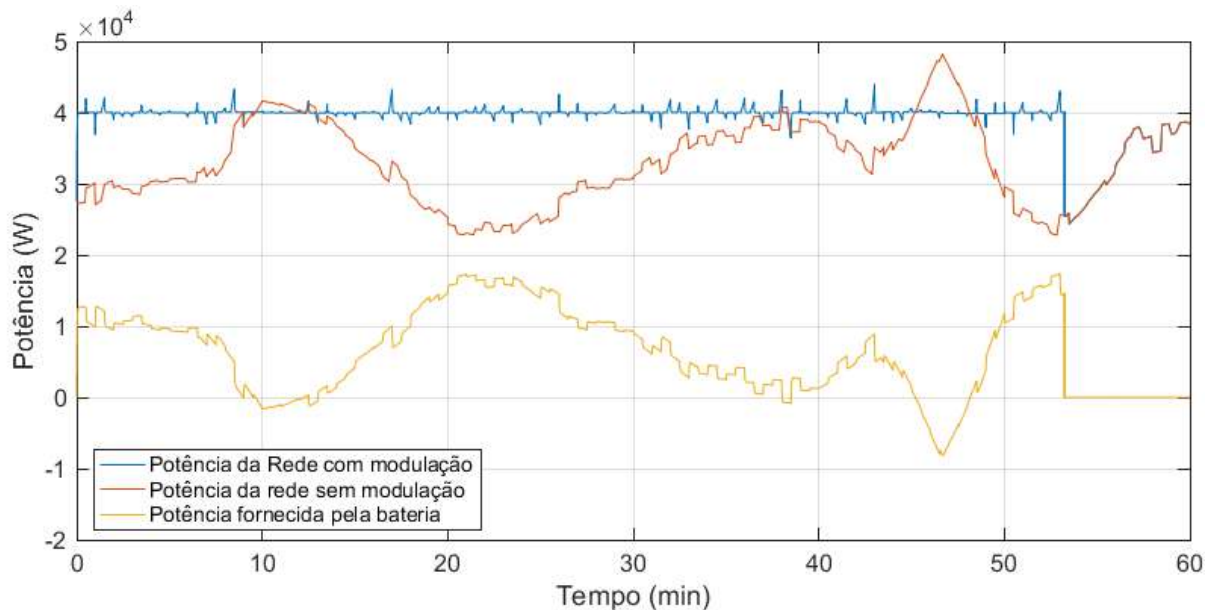
Figura 53 – Modelo cálculo do erro entre referência e rede elétrica para a modulação de carga.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

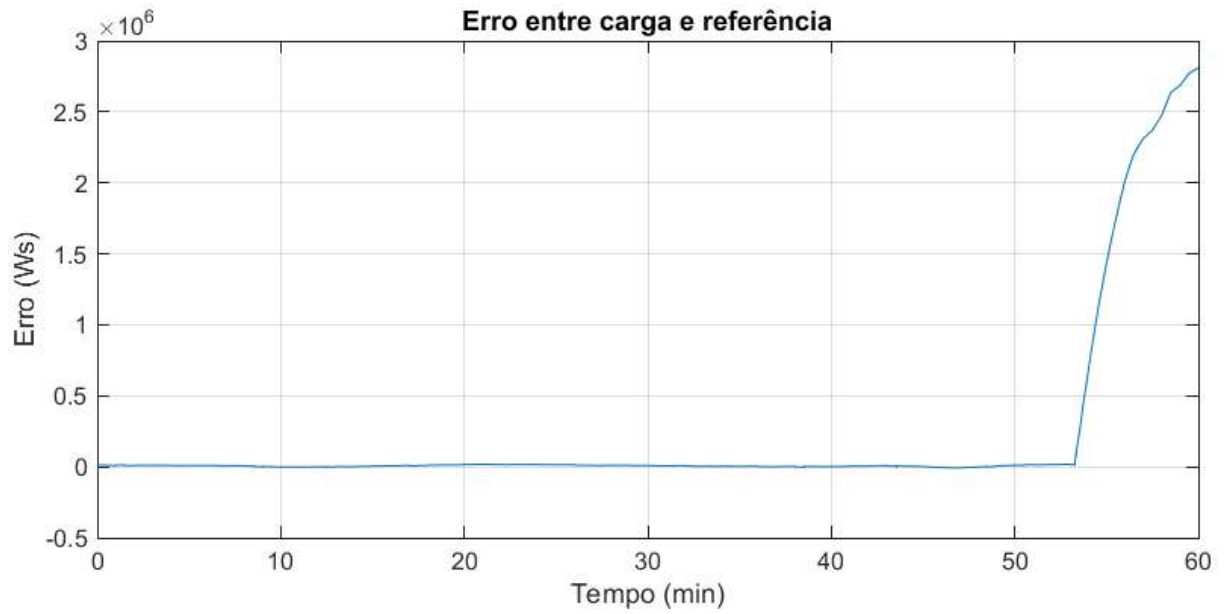
A [Figura 54](#) apresenta a potência demandada da rede pelo *data center* nos cenários com e sem modulação de carga. A [Figura 55](#) apresenta o erro entre a referência e a potência da rede elétrica, que é enviado ao UPS como sinal para a modulação. É possível verificar que no momento 3196 o erro apresenta expressivo crescimento. Isto ocorreu porque o estado de carga da bateria chegou ao seu limite, como é apresentado na [Figura 56](#). A [Figura 57](#) apresenta a dinâmica da potência exigida da bateria.

Figura 54 – Potência demandada da rede elétrica nos cenários com e sem modulação de corrente para mesma dinâmica de carga de TI.



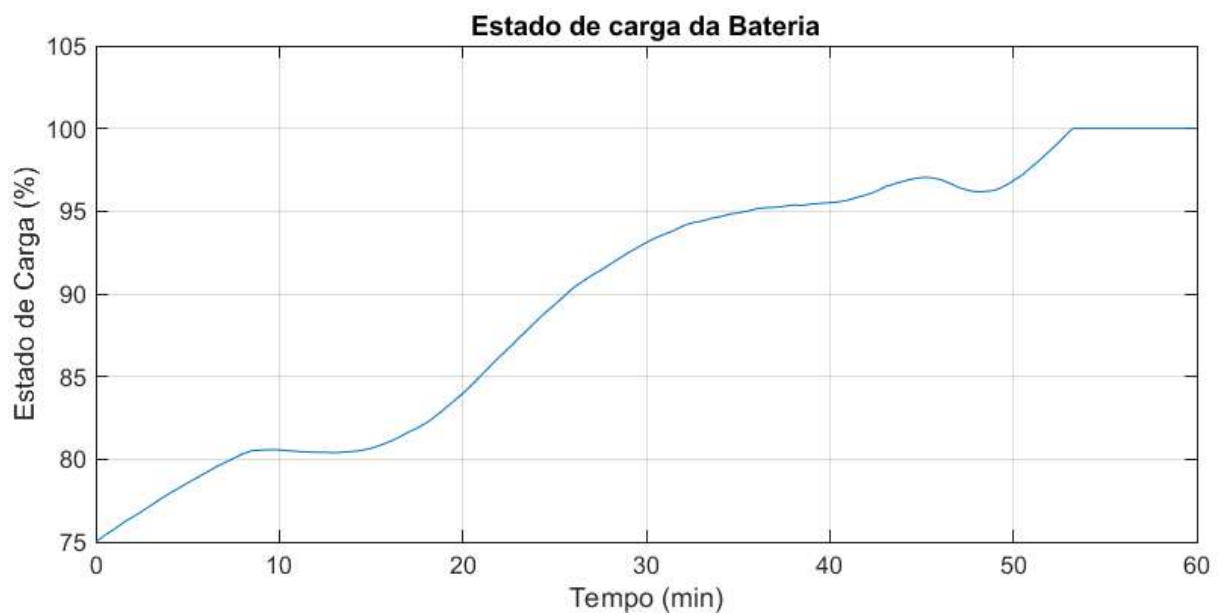
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 55 – Diferença entre potência do *data center* e referência.



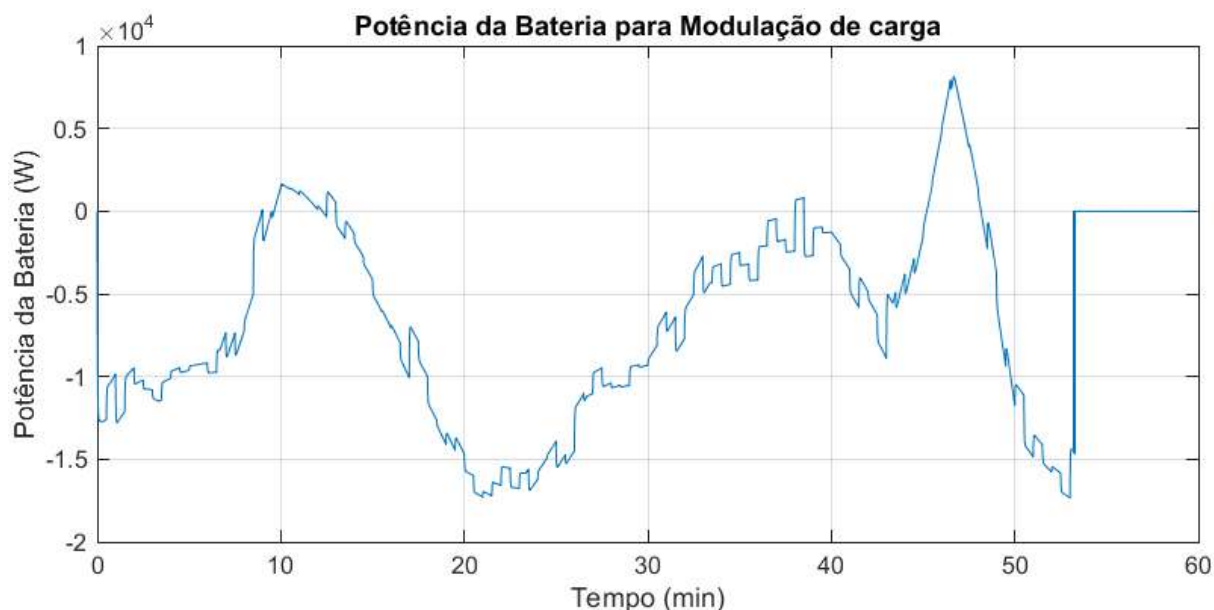
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 56 – Estado de carga da bateria durante simulação de modulação de carga.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 57 – Potência instantânea fornecida pela bateria durante simulação de modulação de carga.

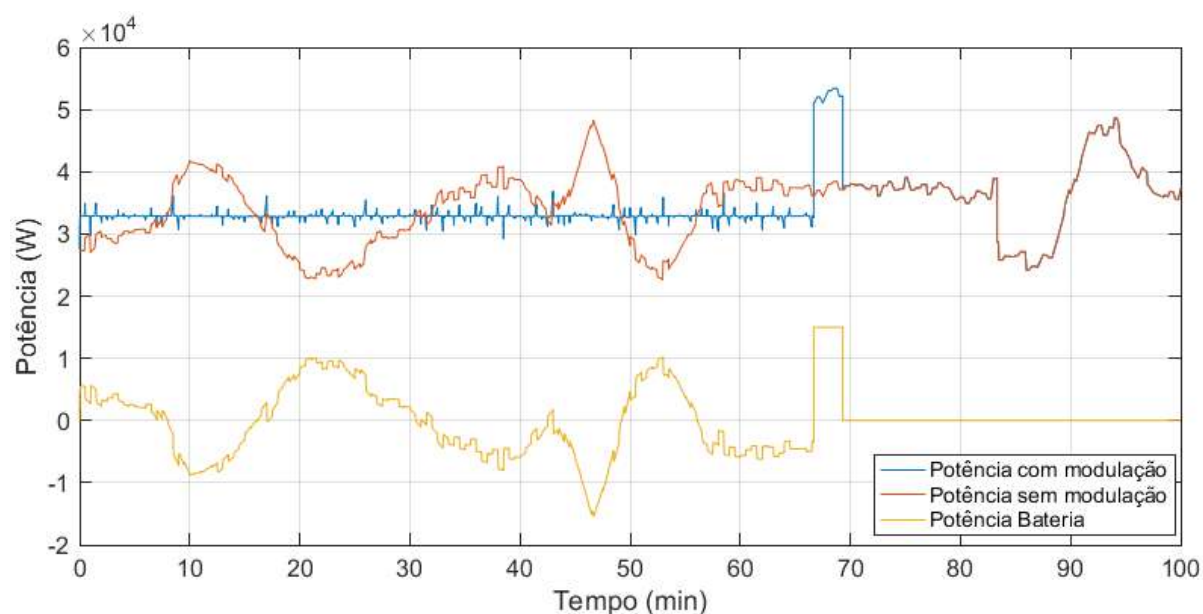


Fonte: Elaboração Própria (2020).

Neste cenário, foi possível verificar que a dinâmica de carga percebida pela rede elétrica foi suavizada com a atuação do UPS, enquanto o estado de carga da bateria estava no intervalo proposto como restrição. Ao chegar no limite superior da bateria, a dinâmica voltou a ser aquela imposta pela carga do *data center*. A estratégia se apresentou válida, apesar de exigir da bateria. No cenário, como a maior parte do tempo a carga do *data center* se apresentou abaixo da referência, a bateria se encontrou no estado de recarregamento durante a simulação. Por esse motivo, a energia armazenada foi utilizada para alimentar a carga durante os picos, que com a modulação não foram percebidos pela rede. Também pode-se notar que a dinâmica rápida da carga de TI não foi totalmente anulada. Esta dinâmica pode ser melhor trabalhada em trabalhos futuros, com o ajuste do controle de potência entregue pelo UPS, que pode ser ajustado para que com maior velocidade também opere para diminuição de variações rápidas de carga.

Para a demonstração da utilização da modulação de carga durante um período determinado e retorno ao estado de carga inicial, foi desenvolvido um segundo cenário. Neste, apresentado a seguir, foram definidos o estado de carga em 90 % da capacidade da bateria, referência de potência para a rede elétrica de 32kW e tempo de modulação de carga de 4000 s. A [Figura 58](#) apresenta a dinâmica da rede elétrica com e sem modulação de energia e a potência demandada da bateria.

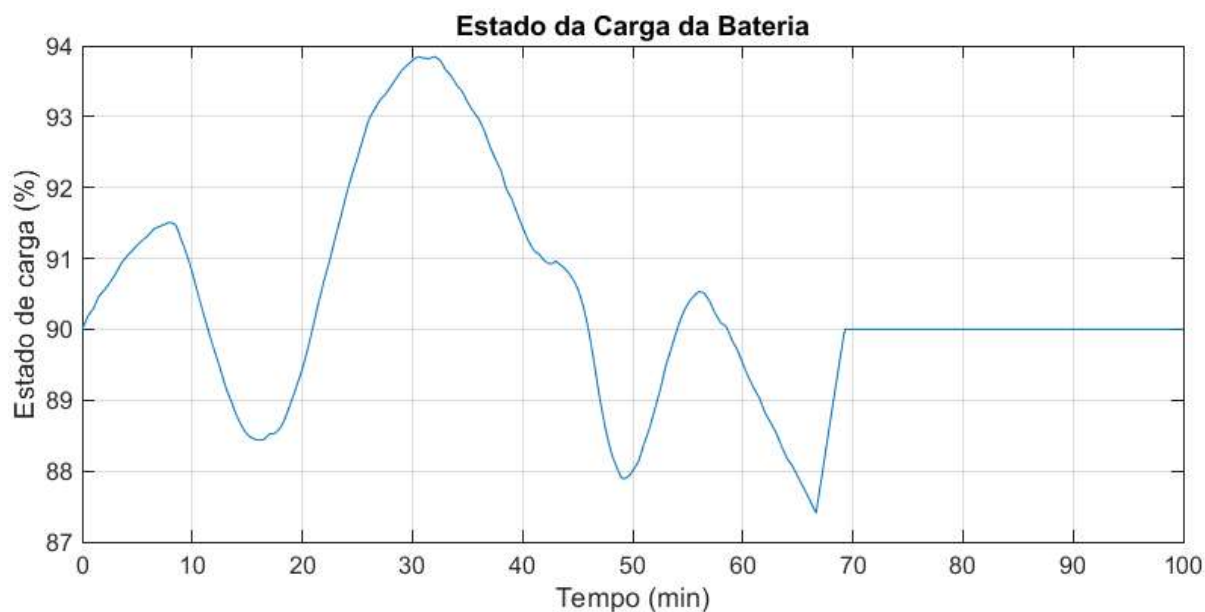
Figura 58 – Potência demandada da rede elétrica nos cenários com e sem modulação de corrente, com a mesma dinâmica da carga de TI e retorno ao estado inicial da carga da bateria.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

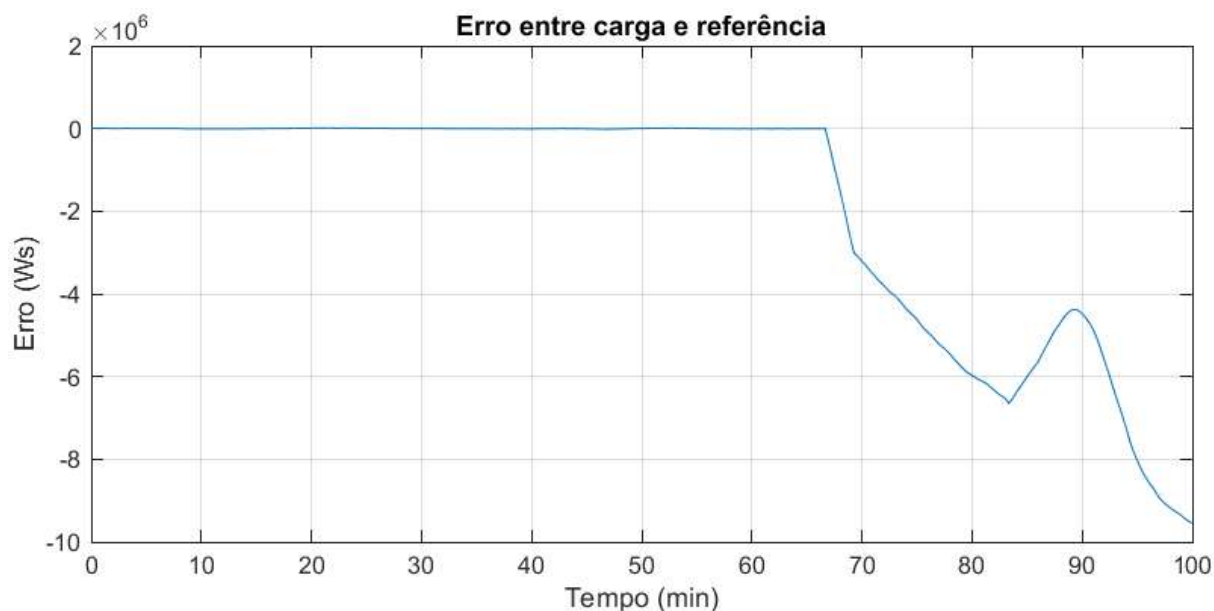
É possível verificar que, depois do tempo determinado de modulação, a rede elétrica é demandada para o carregamento da bateria até seu estado inicial, apresentando um pico de potência. A [Figura 59](#) apresenta a evolução de carga da estado de bateria do UPS e a [Figura 60](#) apresenta o erro entre a rede elétrica com e sem a modulação de carga.

Figura 59 – Estado de carga da bateria durante simulação do cenário de modulação de carga por tempo determinado e retorno ao estado inicial de carga.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 60 – Erro acumulado entre referência a potência da rede elétrica com modulação da potência via UPS por tempo determinado.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

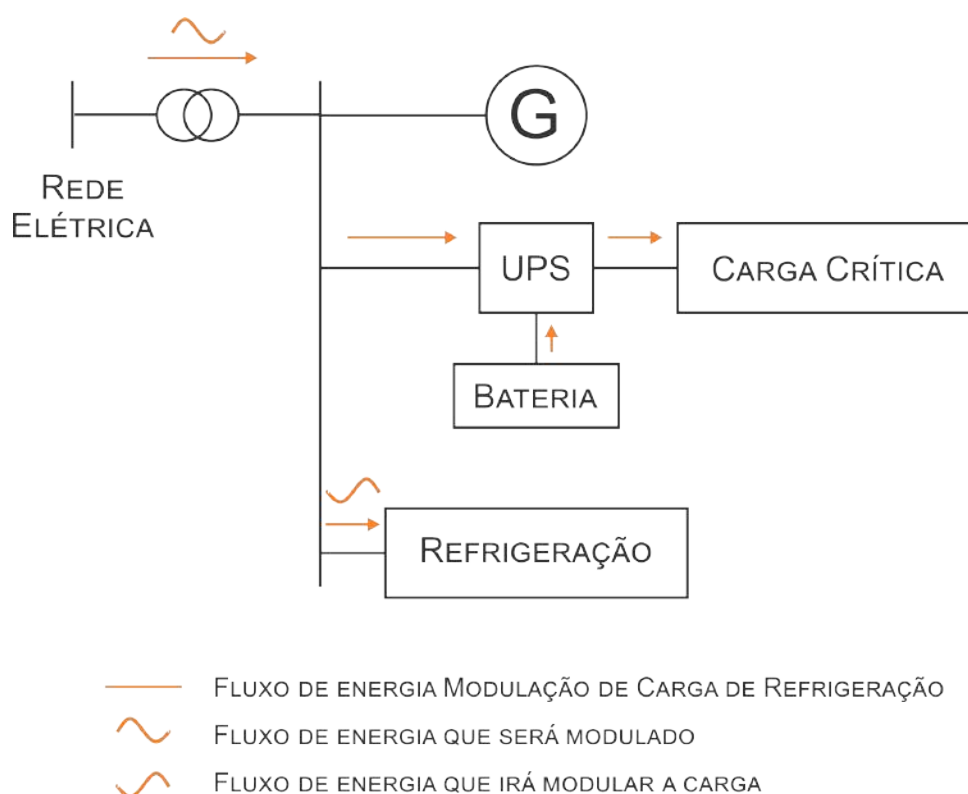
O cenário simulado apresentou pico de carga no final do período determinado para modulação de energia. Mesmo não sendo desejado que aconteçam picos de carga para a rede elétrica, é possível verificar que, desta forma, este aumento na demanda poderá ser previsto e planejado. Além disso, a potência de recarga da

bateria poderá ser limitada para que a rede não seja exigida além de sua capacidade. Com isso, temos um cenário de operação ideal, em que a bateria retorna ao mesmo estado ao final do ciclo. Desta forma, a potência de referência será a média de potência no ciclo e, retirando essa informação do histórico de demanda do *data center*, o pico fornecido para recarga da bateria ao estado inicial poderá ser diminuído e controlado.

6.2.2 Refrigeração

A modulação de carga através do sistema de refrigeração será realizada diminuindo ou somando o erro obtido entre a diferença de energia consumida pelo *data center* e a referência estipulada. O objetivo deste cenário é compensar, através da potência entregue ao sistema de refrigeração, ondulações de carga percebidas pela rede elétrica. A [Figura 61](#) ilustra como o fluxo de potência será conduzido para este cenário.

Figura 61 – Representação do fluxo de energia para o cenário modulação de carga pela refrigeração.



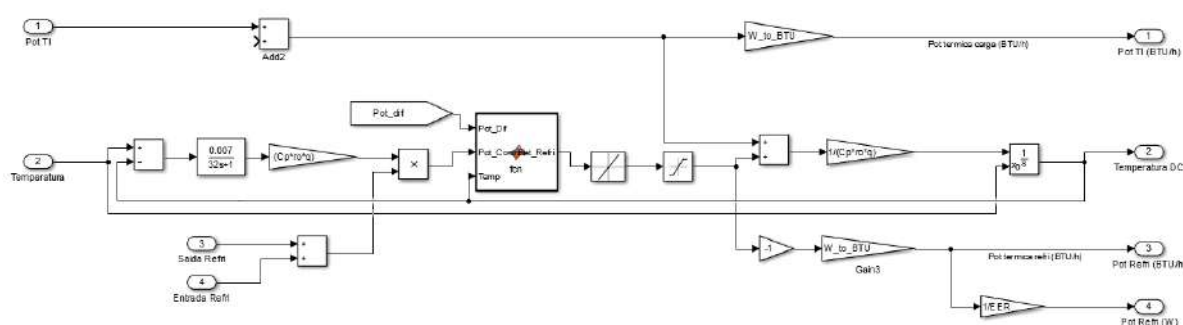
Fonte: Elaboração Própria (2020).

O erro entre a potência percebida pela rede elétrica e a referência será obtido da mesma forma utilizada pela estratégia de modulação de carga com auxílio do UPS, apresentado na [Figura 53](#). Como restrições para este cenário, foram colocadas

que a temperatura não pode ultrapassar o intervalo de 18 °C a 25 °C. Apesar de a recomendação da norma [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#) ser o intervalo de 18 °C a 27 °C, foi delimitado um valor superior menor devido à temperatura apresentar risco ao funcionamento da carga crítica somente em temperaturas superiores, e o limite inferior ser relacionado apenas com a eficiência energética global do *data center*. Além disso, também foi colocado no modelo a restrição de que o sistema de refrigeração não provê energia, apenas deixa de consumir.

Para o estudo de caso, o modelo utilizado é apresentado na [Figura 62](#). A temperatura de referência configurada no controle é de 22 °C e a referência de potência consumida pelo *data center*, como na [subseção 6.2.1](#) é de 40 kW.

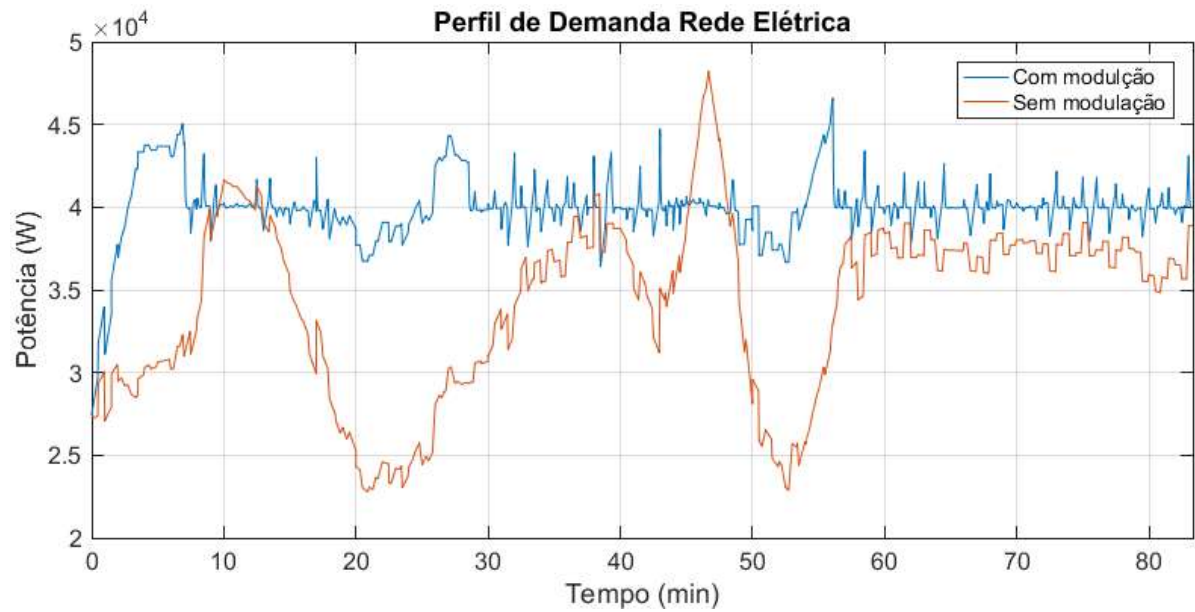
Figura 62 – Modelo de refrigeração para modulação de carga.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

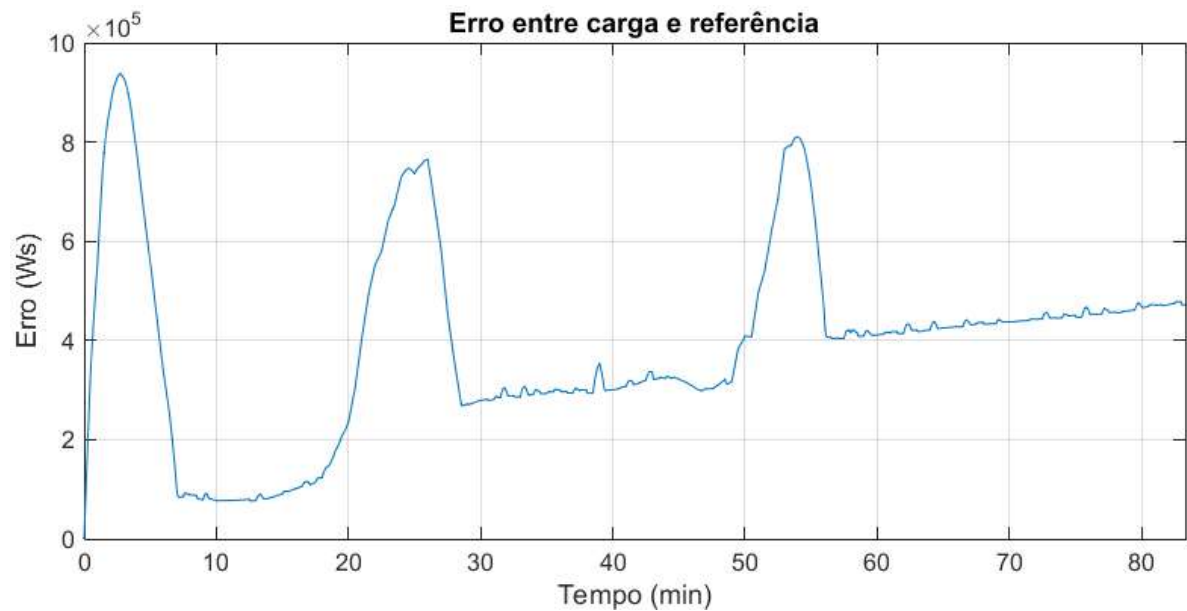
Através da simulação, é possível verificar o perfil de carga do ponto de vista da rede elétrica do *data center* com e sem a modulação realizada pela refrigeração, apresentada na [Figura 63](#). A [Figura 64](#) apresenta o erro acumulado entre a rede elétrica e a referência, utilizado para calcular a atuação da modulação. A [Figura 65](#) mostra a variação de temperatura durante a atuação da modulação e a [Figura 66](#) mostra a potência entregue ao sistema de refrigeração com e sem modulação.

Figura 63 – Demanda de carga vista da rede elétrica com e sem modulação de carga pela refrigeração.



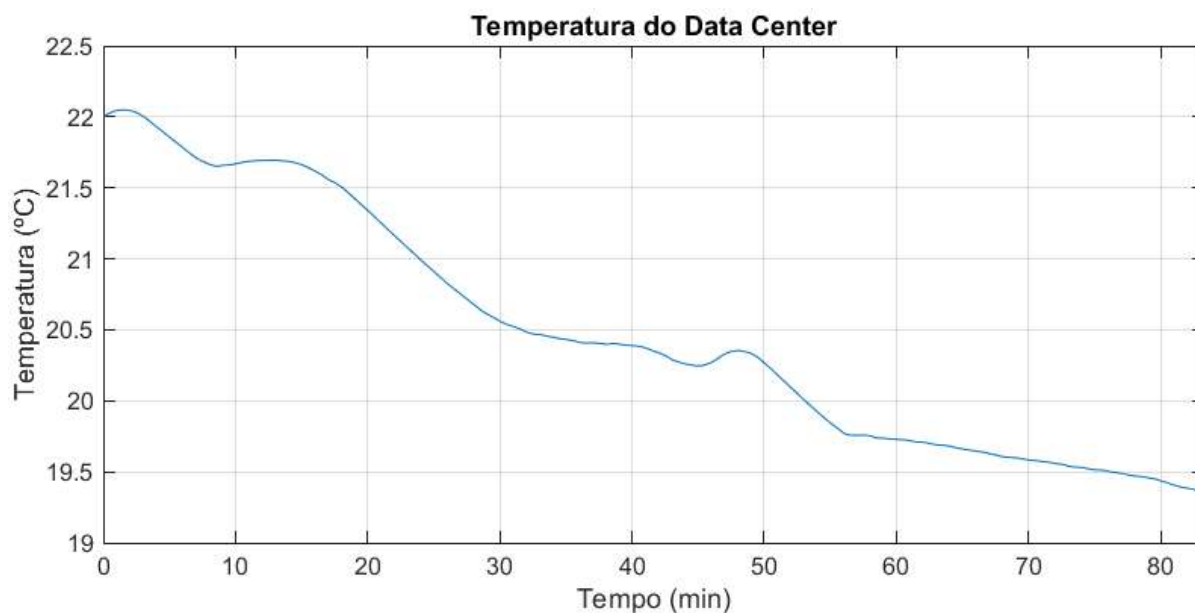
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 64 – Erro acumulado entre referência e demanda do *data center*.



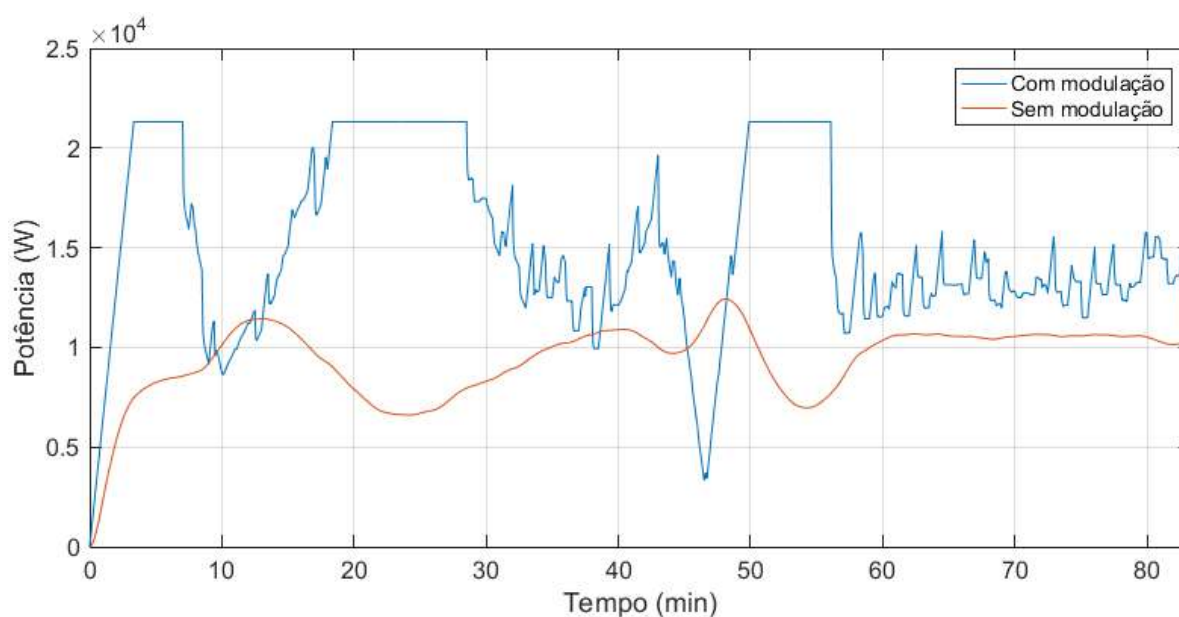
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 65 – Dinâmica da temperatura com modulação de carga pela refrigeração.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 66 – Perfil de potência do sistema de refrigeração com e sem modulação de carga.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

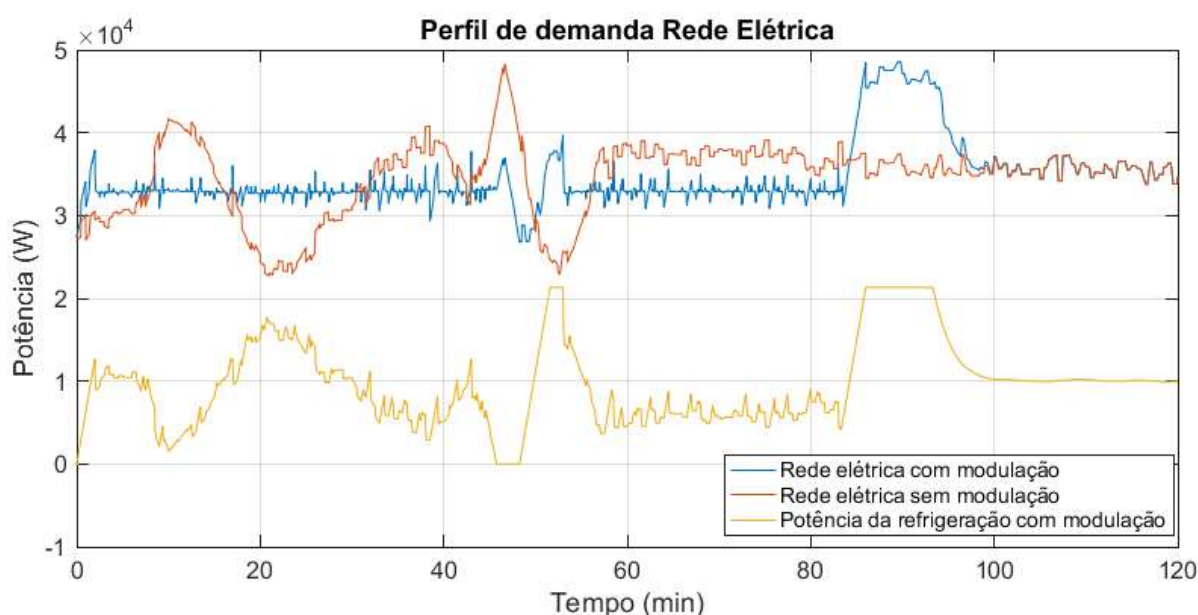
Como a carga do *data center* permanece a maior parte do tempo abaixo da referência, o sistema de refrigeração atuou como um acumulador de energia, diminuindo a temperatura do ambiente. Em momentos em que a potência do sistema completo foi maior que a referência, o sistema de refrigeração deixou de consumir energia, elevando a temperatura do sistema. Também é possível verificar que a utilização da refrigeração não foi tão satisfatória quanto o UPS devido a saturação de potência consumida. Nos

momentos em que a refrigeração estava trabalhando com potência máxima, o erro apresentou aumento.

Devido a saturação apresentada por este subsistema, alguns picos de energia foram criados. Isto ocorreu devido ao sistema de refrigeração se manter saturado por certo tempo, aumentando o acúmulo de erro entre a referência e a potência da rede elétrica. Quando houve alteração no perfil de carga, houve demora do controle em atuar devido ao erro acumulado. Mesmo a refrigeração sendo recomendada para modulação de dinâmicas mais lentas, ajustes no cálculo da realimentação de controle também podem ajudar a mitigar este problema.

Para apresentar a operação ideal de um *data center*, um segundo cenário será apresentado. Neste, adicionasse a restrição de um período de tempo para atuação da modulação de carga, e retorno da temperatura para sua referência inicial. Para isso, a referência de carga foi definida como 32 kW e o período de modulação de 5000 s. A [Figura 67](#) apresenta o perfil de carga imposto à rede elétrica com e sem modulação de carga através do sistema de refrigeração, e a potência demanda por este sistema.

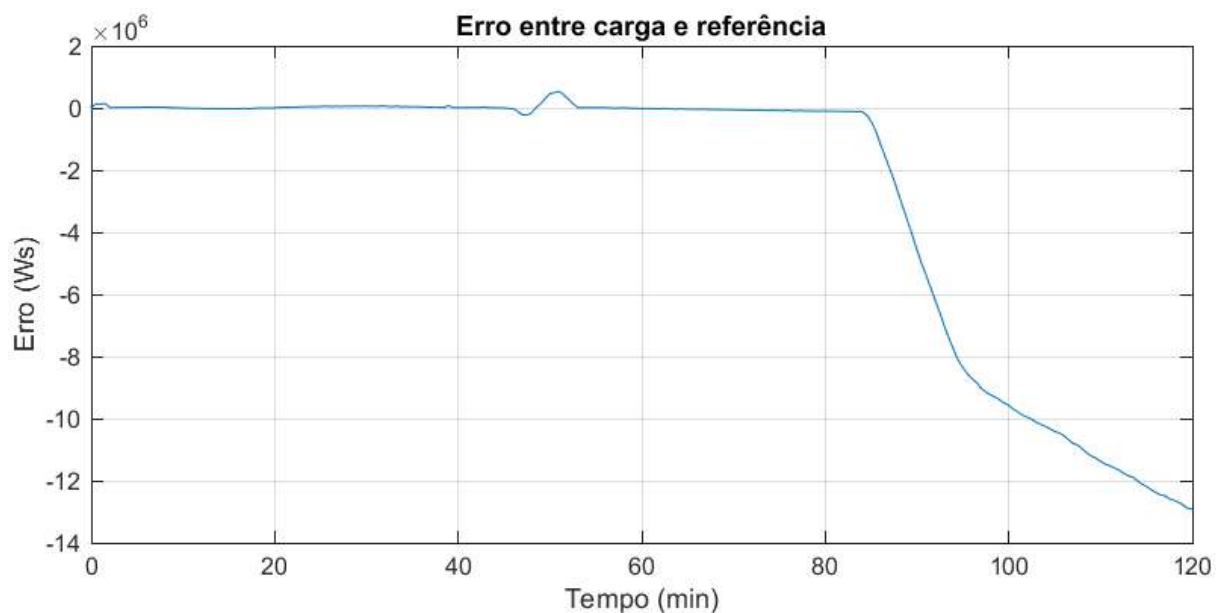
Figura 67 – Demanda de carga imposta a rede elétrica com e sem modulação de carga pelo sistema de refrigeração e potência aplicada ao sistema de refrigeração.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

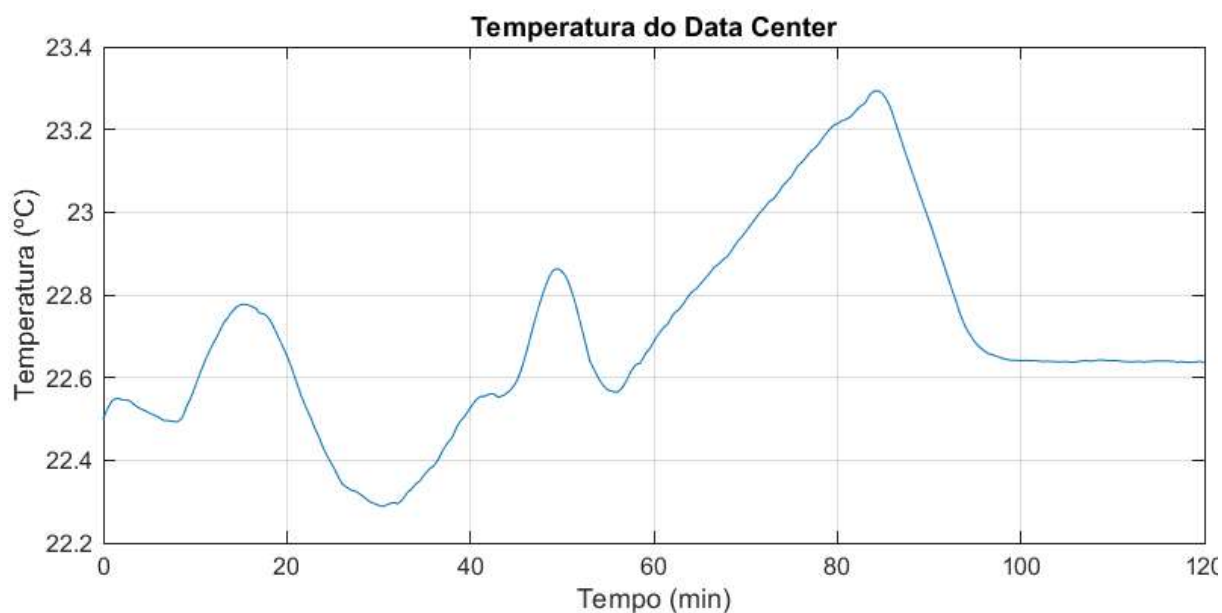
A [Figura 68](#) apresenta o erro acumulado durante a simulação e a [Figura 69](#) apresenta a evolução da temperatura devido ao trabalho da modulação da carga e seu retorno à referência.

Figura 68 – Erro acumulado entre referência e demanda do *data center*.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 69 – Dinâmica da temperatura com modulação de carga pelo sistema de refrigeração por período determinado e retorno ao estado inicial.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Neste cenário, similar à modulação de carga através das baterias do UPS, também é possível observar que a carga imposta à rede elétrica apresenta aumento ao fim do período de modulação, para que o sistema retorne ao seu estado inicial de temperatura. Em termos de operação do *data center*, a divisão da modulação em ciclos planejados, em que é possível determinar quando a carga de retorno ao estado

inicial será imposta à rede e o restabelecimento das reservas de energia é o mais indicado. Ainda, com a utilização do histórico de carga do *data center*, é possível definir a potência de referência mais próxima a média de potência da demanda do *data center*, objetivando-se assim diminuir o pico de potência para o retorno do estado inicial e restabelecimento das reservas de energia, tanto na modulação por UPS quanto por refrigeração.

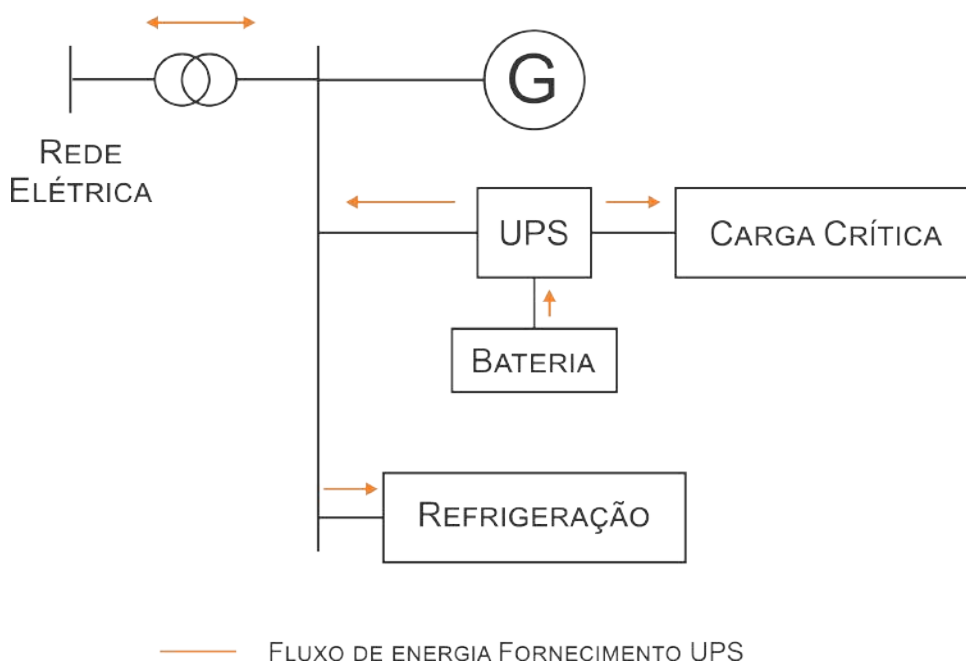
6.3 Fornecimento de energia

Nesta seção, o serviço ancilar apresentado para suporte à resiliência da rede elétrica será o fornecimento de energia. Como os *data centers* possuem armazenamento de energia em seu sistema de UPS e possibilidade de geração de energia através do sistema de grupo moto gerador, estes ambientes podem ajudar na resiliência da rede elétrica quando esta estiver desequilibrada devido à falta de energia disponível para sustentar a carga. Este cenário, no caso da *smart grid*, pode acontecer quando a geração por fontes renováveis diminuir e não conseguir suprir a carga demanda pelo sistema, se a rede tiver a capacidade de transmitir energia diminuída por um evento planejado ou não, quando a carga instantânea for maior que a planejada, entre outros.

6.3.1 UPS

O cenário de fornecimento de energia através do sistema de UPS será realizado drenando a energia máxima das baterias até que estas cheguem ao limite de estado de carga de 50%. Este limite foi estabelecido para que o UPS ainda conserve a energia necessária recomendada pela [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#) para manter o *data center* por 15 minutos, resguardando a disponibilidade do *data center* em uma situação de ausência da rede elétrica. A energia máxima fornecida pelo UPS será o estimado para a carga de TI em projeto, que é de 50 kW. O fluxo de energia desta simulação é apresentado na [Figura 70](#).

Figura 70 – Representação do fluxo de energia para o cenário de fornecimento de energia através do UPS.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

O tempo de entrada de fornecimento de energia pelo UPS foi estabelecido em 300 s de simulação, e a saída do fornecimento de energia ao alcançar 50% de carga, que neste caso será 15 minutos após o início do fornecimento. O recarregamento das baterias foi estipulado para logo após a finalização do fornecimento de energia, mas este poderia ser alocado a qualquer momento, fazendo que o deslocamento da carga seja movido para quando a rede elétrica já esteja preparada novamente.

A [Figura 71](#) apresenta a dinâmica de potência do *data center* da perspectiva da rede elétrica, em comparação a dinâmica sem o fornecimento de energia pelo UPS. O estado de carga do UPS é apresentado na [Figura 72](#), demonstrando o descarregamento das baterias com potência constante máxima até o limite de 50%. A [Figura 73](#) apresenta o perfil de potência do sistema de UPS, durante o fornecimento de energia e recarregamento das baterias.

Figura 71 – Perfil de demanda do *data center* da perspectiva da rede elétrica nas simulações com e sem fornecimento de energia pelo UPS.



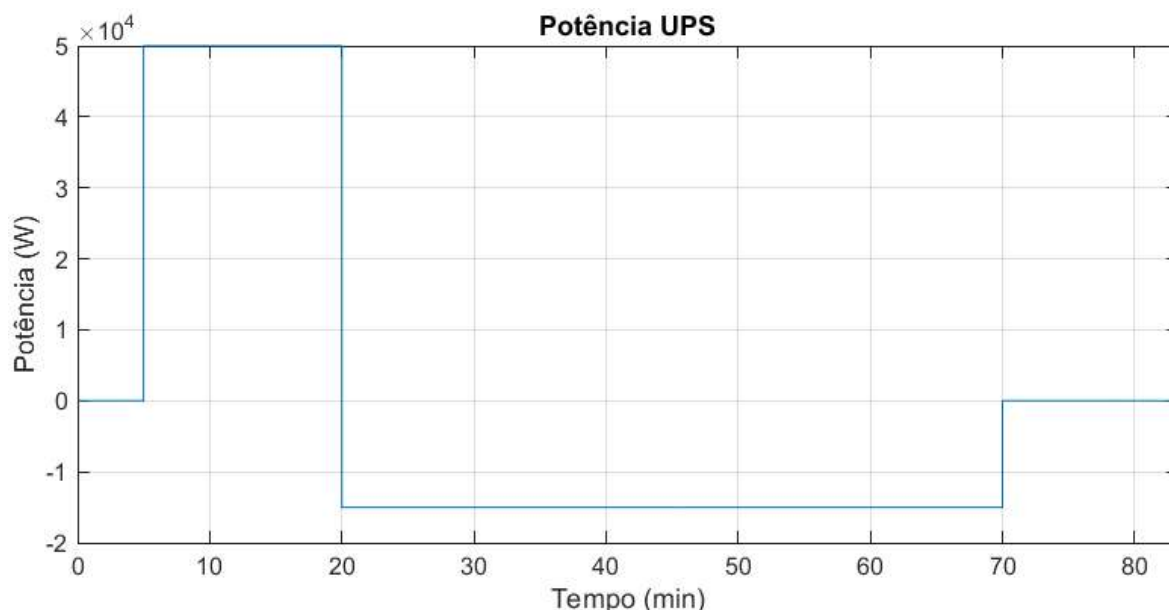
Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 72 – Estado de carga das baterias durante o fornecimento de energia pelo UPS.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

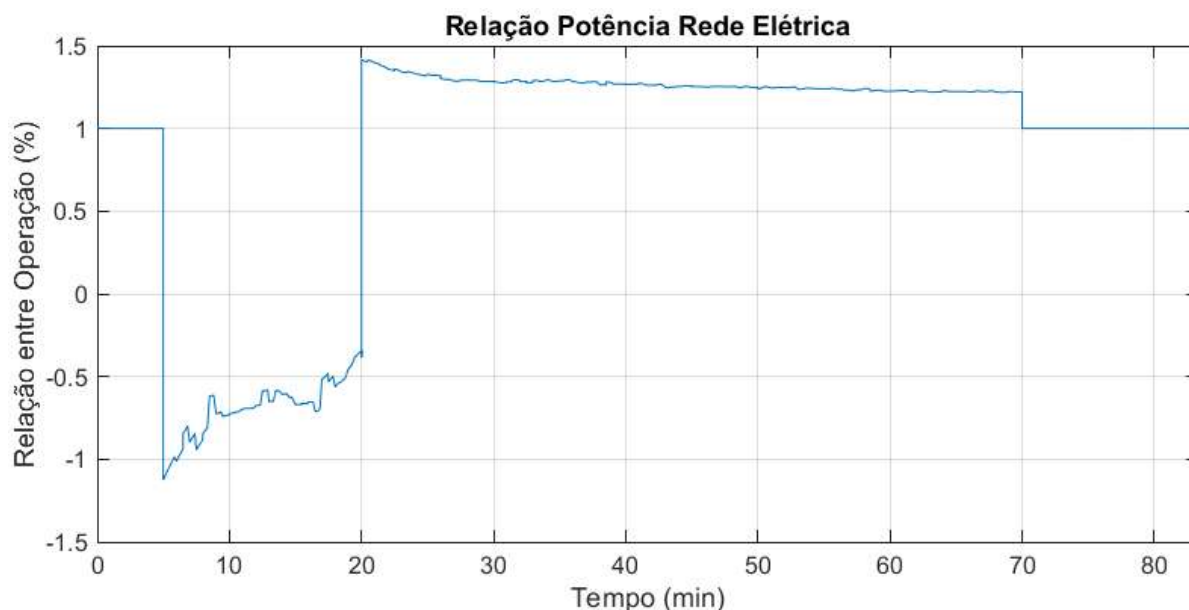
Figura 73 – Perfil de potência do UPS durante o fornecimento de energia.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Na [Figura 74](#), é possível verificar a relação entre a potência do *data center* em operação normal e a potência em operação de fornecimento de energia pelo UPS de maneira percentual. Através deste gráfico, pode-se avaliar que o *data center*, no momento de entrada do UPS, fornece energia para a rede de forma instantânea. Depois de esgotada a possibilidade de fornecimento de energia, as baterias voltam a carregar. Esta carga adicional, apresentada a partir do instante 1500 s de simulação, pode ser gerenciada. No cenário proposto, o recarregamento acontece logo depois da descarga, a uma taxa de 30% da carga máxima, contudo é possível o controle desta demanda para um momento de baixa carga da rede elétrica, como períodos noturnos ou de grande extração de energia de fontes renováveis.

Figura 74 – Relação entre potência demanda da rede elétrica nos cenários com e sem fornecimento de energia pelo UPS.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

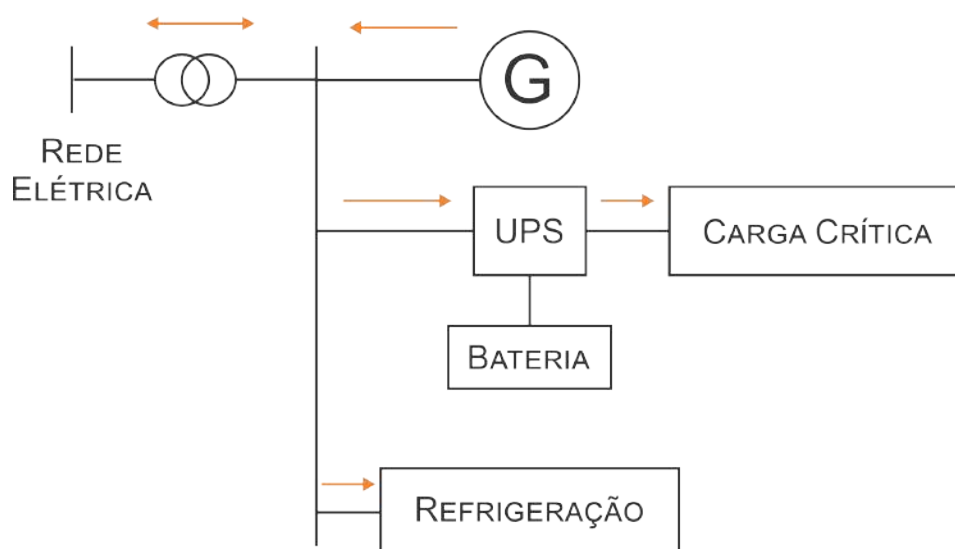
Através deste cenário, é possível comprovar de forma teórica que o *data center* pode fornecer energia rapidamente para estabilização da rede elétrica em momentos extremos de desequilíbrio entre geração e demanda. De forma prática, alguns avanços na arquitetura do UPS deverão ser projetados para este caso, como a bidirecionalidade de fluxo de energia na entrada do UPS. Como apontado na [subseção 4.3.2](#), o fluxo de energia bidirecional do UPS pode ser atingido através de chaves eletrônicas bidirecionais, mas este grau de liberdade encarece o projeto do sistema, sendo hoje não utilizado.

6.3.2 Grupo Moto Gerador

Para manter a disponibilidade, *data centers* possuem um sistema de geração reserva próprio, que são constituídos de geradores, comumente a diesel, capazes de suportar a carga total do ambiente quando a rede elétrica está ausente, apresentados na [subseção 2.3.2](#). O cenário que será simulado nesta seção será a operação do grupo moto gerador conectado à rede elétrica, fornecendo energia para manter a rede em casos extremos. Como fontes renováveis de energia são estocásticas e intermitentes, em momentos de baixa produção, o acionamento de geradores de *data centers* pode promover a resiliência da rede. Para isso, a simulação será configurada para acionar a entrada do grupo moto gerador no instante 300 s e iniciar seu desligamento no momento 3000 s. Desta forma, o sistema de geração reserva se manterá ligado por 45 minutos com potência máxima, e a energia excedente a requerida pelo *data center* poderá

injetada na rede elétrica. O fluxo de energia proposto neste cenário é exemplificado na [Figura 75](#). A potência máxima projetada para o grupo de geradores é de 100 kW, estimado durante o projeto do *data center*.

Figura 75 – Representação do fluxo de energia para o cenário de fornecimento de energia através do grupo moto gerador.

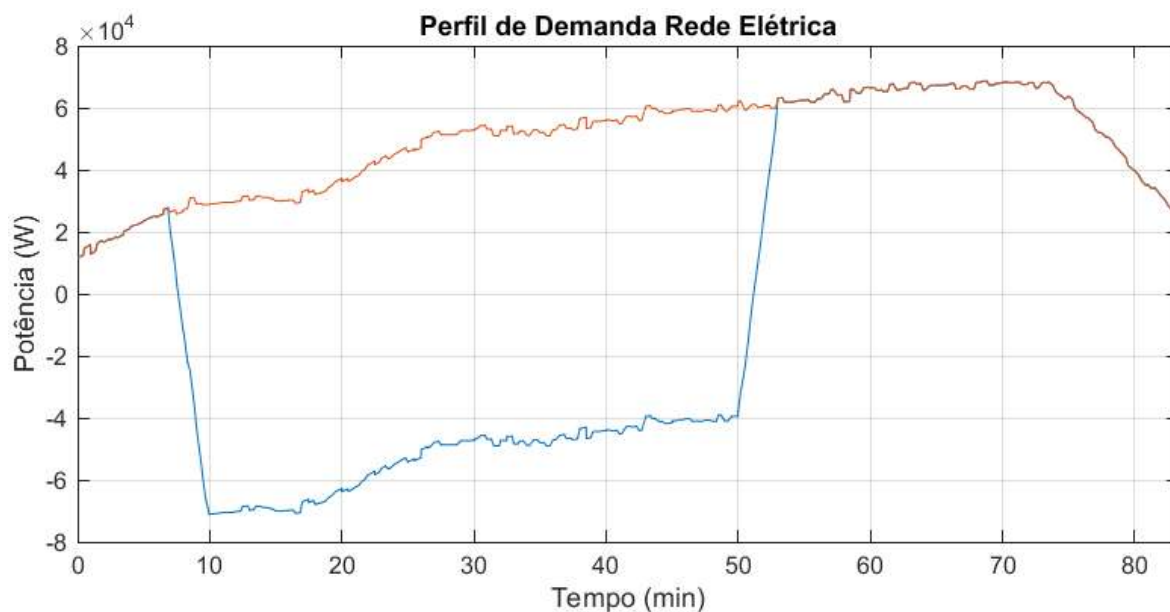


— FLUXO DE ENERGIA FORNECIMENTO GRUPO MOTOR GERADOR

Fonte: Elaboração Própria (2020).

Como resultado desta simulação, a [Figura 76](#) apresenta a dinâmica de potência no ponto de acoplamento comum do *data center* com a rede elétrica nos cenários com e sem geração de energia pelo grupo de geradores. A [Figura 77](#) mostra a potência fornecida pelos geradores nos tempos estipulados de entrada e saída de operação.

Figura 76 – Perfil de demanda do *data center* da perspectiva da rede elétrica nas simulações com e sem fornecimento de energia pelo grupo moto gerador.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 77 – Perfil da potência do grupo moto gerador durante o fornecimento de energia.

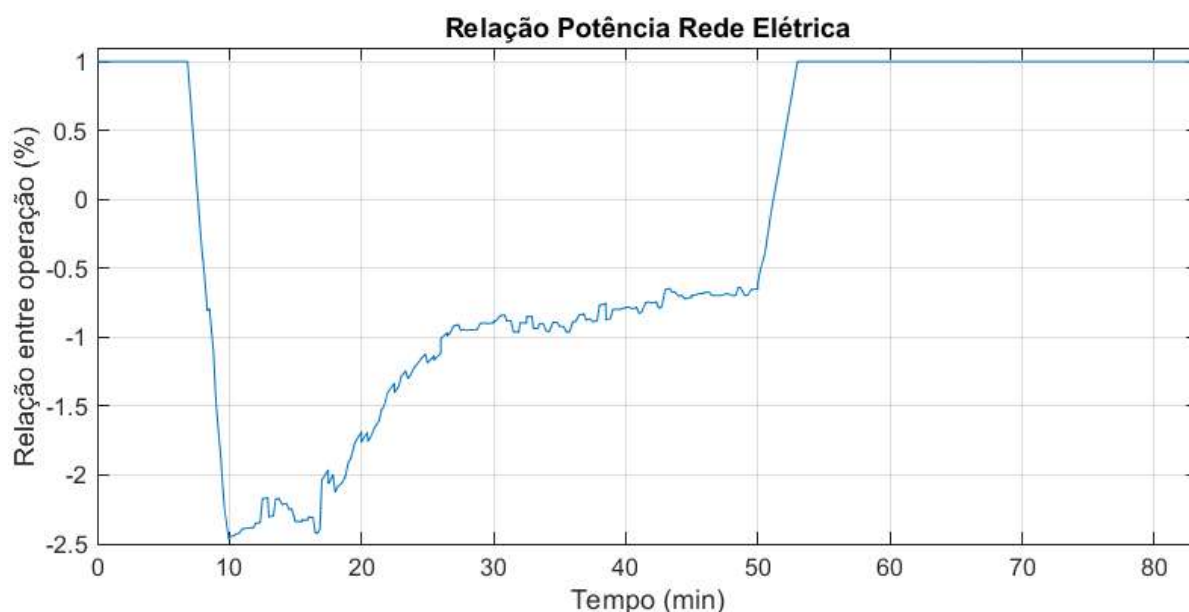


Fonte: Elaboração Própria (2020).

A [Figura 78](#) apresenta a relação entre a potência do *data center* com fornecimento de energia dos geradores em relação a potência em operação normal. Este gráfico demonstra que, durante a operação com o grupo moto gerador em execução, a energia consumida pelo *data center* é totalmente provida pela geração reserva e o excedente de energia é injetado na rede elétrica. Neste cenário, não há

uma transferência de tempo de carga, visto que a fonte de energia primária dos geradores é o combustível, que não acrescenta carga posterior à rede elétrica, como o sistema de UPS.

Figura 78 – Relação entre potência demandada da rede elétrica nos cenários com e sem fornecimento de energia pelo grupo moto gerador.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Com a simulação deste cenário é possível verificar que o *data center* pode fornecer energia em momentos em que o equilíbrio entre geração e carga da rede elétrica estiver comprometido, auxiliando a resiliência de redes que possuam alta penetração de fontes renováveis de energia quando necessário. Como restrição para o uso da estratégia, o tempo de entrada em funcionamento dos geradores deve ser avaliado, pois a entrada em rampa destes equipamentos deve ser considerada em sua aplicação, e a bidirecionalidade da chave de transferência deverá ser obrigatória para este tipo de funcionamento, o que não é comum nos *data centers* atuais. Além desta restrição física, existem restrições regulamentares, como apresentado na [subseção 4.3.3](#).

6.4 Conclusão

Este capítulo teve como objetivo analisar o estudo de caso de um *data center* para validar as possibilidades de auxílio deste tipo de carga à resiliência da rede elétrica. Com o aumento das fontes renováveis de energia, o desenvolvimento de novas estratégias da gestão da rede elétrica são fomentados, devido ao caráter intermitente e estocástico destas novas fontes. Por esse motivo, o conceito da *smart*

grid foi introduzido, para trazer maior controle e novas formas de gerência da rede. Este novo contexto vem sendo evoluído, e a análise em conjunto à ambientes de *data center* deve trazer novas formas de melhoria da resiliência do fornecimento de energia.

Assim, as maneiras de provisão de serviços ancilares disponíveis por *data centers*, mapeados na [seção 4.4](#), foram simulados com os modelos desenvolvidos no [Capítulo 5](#).

Primeiramente, os cenários de corte parcial de carga de TI e refrigeração foram apresentados. Estes cenários têm como objetivo abrandar a potência demandada do *data center*, valendo-se da flexibilidade que a estrutura de um *data center* oferece, em momentos em que o equilíbrio entre a geração e demanda estiver prejudicado por pouca disponibilidade da fonte primária de energia. Esta opção ainda está em fase de homologação pelo ONS, como apresentado na [subseção 4.2.4](#), foi validada com o objetivo de verificar qual seria o impacto na operação do *data center* e qual a significância de cada subsistema para o total de carga do *data center*, além da magnitude de intervalo de tempo que cada uma das estratégias teria. Observou-se que para intervalos de tempo menores, e maior percentual de diminuição da demanda, o corte de carga de TI é indicado, e para tempos maiores, porém com menor percentual de diminuição da potência consumida, o corte do sistema de refrigeração trará melhores resultados.

Os cenários de modulação da carga do *data center* foram também apresentados. Estes cenários têm como objetivo controlar a demanda do *data center* para prover maior previsibilidade de demanda à rede elétrica, e melhor controle do equilíbrio entre geração e consumo, além de trazer vantagens no dimensionamento da rede de distribuição, devido a diminuição do fator de pico da carga em relação ao ponto de acoplamento. Para esta estratégia, foram utilizadas a energia armazenada no sistema de UPS e o grau de liberdade disponível no sistema de refrigeração. Este tipo de controle da demanda já é incentivado pela regulamentação brasileira através de tarifas diferenciadas para determinados grupos de cargas, como apresentado na [subseção 4.2.3](#). Através das simulações, foi possível constatar que o sistema de UPS e refrigeração podem melhorar o perfil de demanda de um *data center* por determinado período de tempo, que está relacionado ao grau de liberdade da capacidade das baterias e da temperatura, respectivamente, que será determinado no controle. Foi observado que o sistema de UPS pode ser mais efetivo, e ambos os tipos de controle devem ser avaliados, pois trazem esforços às baterias e aos equipamentos de refrigeração.

Além destes, os cenários de fornecimento de energia através dos sistemas de UPS e grupo de geradores reserva foram avaliados. Apesar de *data centers* possuírem energia armazenada que podem ser utilizadas de forma rápida (baterias) ou

com certo atraso, mas por um período prolongado, estas possibilidades ainda precisam esperar pela evolução da regulamentação, como descrito na [subseção 4.2.5](#). Para que seja viável esta forma de auxílio à rede, equipamentos como o sistema de UPS e a chave de transferência de rede devem ser previstos para bidirecionalidade do fluxo de energia. A tecnologia já existe, mas não é utilizada hoje em dia por encarecer o projeto destes equipamentos, visto que não existe ainda remuneração prevista para estes tipos de serviço. Contudo, foi analisado que estas possibilidades são aplicáveis, e através das simulações foi possível verificar a dimensão de energia fornecida, com o uso de cada estratégia.

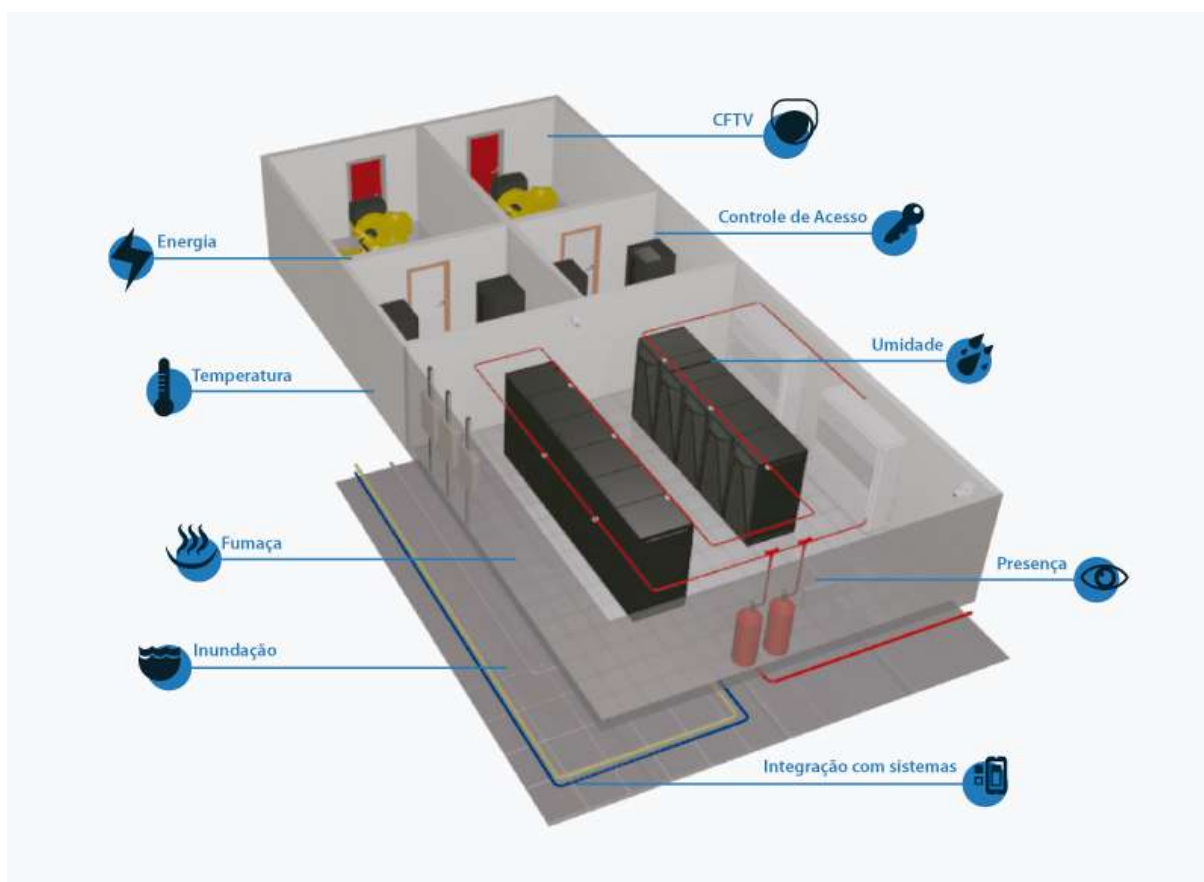
Com este estudo de caso, é possível então detalhar quais as figuras de mérito importantes em cada tipo de operação, para inseri-las em uma ferramenta de gerenciamento de *data centers* trazendo vantagens aos gestores e visibilidade para a tomada de decisão de ingressar no serviço de auxílio a rede elétrica.

7 FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE SUPORTE À OPERAÇÃO DE *DATA CENTERS*

Ferramentas computacionais para monitoramento e gestão de infraestruturas vêm crescendo na indústria de ambientes de missão crítica e *data centers*. Estas ferramentas, chamadas de DCIM, tem como propósito melhorar a visibilidade dos gestores a seus ambientes, assim como registrar os dados históricos de evolução das grandezas monitoradas e ajudar a tomada de decisão dos responsáveis em relação a capacidade, ampliação, eficiência e organização.

No Brasil, a plataforma DataFaz® criada pela empresa Fazion e desenvolvida pela empresa Specto tem grande destaque em *data centers* de médio e grande porte que desejam aumentar a sua disponibilidade através de sensoriamento e segurança de seus sistemas. Através do monitoramento de grandezas físicas como temperatura, umidade, fumaça e energia elétrica, além de funcionalidades como controle de acesso e câmeras (demonstrado na [Figura 79](#)), entre outros, a plataforma DataFaz® ajuda gestores a melhorar seu grau de eficiência e disponibilidade, mantendo os ambientes sob controle e alertando desvios de operação, através de configurações personalizadas para cada ambiente ([SPECTO TECNOLOGIA, 2019](#)), além de ajudar a planejar o crescimento e manutenção da infraestrutura do *data center*. Devido ao seu caráter de inovação, a plataforma DCIM DataFaz ganhou o prêmio "Ideia para o futuro e conceitos de *design*" pelo *DataCenterDynamics Awards Brasil* em 2012 ([DATACENTERDYNAMICS, 2012](#)).

Figura 79 – Diagrama de grandezas e funcionalidades da plataforma DataFaz.



Fonte: [Specto Tecnologia \(2019\)](#).

Com auxílio dos estudos e simulações realizados neste trabalho, o projeto de uma nova funcionalidade para a plataforma DCIM será realizado, visando adicionar informações importantes para a decisão dos gestores de ingressar seus ambientes como serviços ancilares à rede elétrica. As grandezas analisadas no estudo de caso do [Capítulo 6](#) serão analisadas e organizadas para que a nova funcionalidade identificada neste trabalho seja adicionada e traga valor aos gestores de *data centers*.

As grandezas apresentadas já fazem parte da coleta de informação proporcionada pelo DCIM, adquiridas em tempo real através de *hardwares* instalados ou integrados à solução. A disponibilização dessa informação de forma concisa e organizada será verificada para que a operação do *data center* nos cenários propostos seja possível e avaliada. Estas informações são armazenadas em um banco de dados e apresentadas através de uma interface *WEB*, que pode ser acessada pela equipe de monitoramento do *data center* através de *web browsers*, em que é disponibilizado as grandezas atuais, assim como relatórios históricos, painéis de controle configuráveis, entre outros.

Este capítulo tem a finalidade de consolidar os conhecimentos adquiridos

através do estudo de caso em visualizações das métricas na plataforma DCIM para acrescentar um novo ponto de vista para *data centers* que desejem participar na melhoria da resiliência da rede elétrica, beneficiando o sistema elétrico geral, assim como sua própria disponibilidade a medida que a disponibilidade de energia é melhorada.

7.1 Monitoramento da carga crítica

Apesar de, no estudo de caso, a carga crítica ter sido tratada como variável independente, que não pode ser controlada, esta deverá ser monitorada pelo sistema DCIM de forma a exibir as informações coletadas com relação a potência e temperatura e calcular métricas importantes. Dentre as opções para monitoramento da carga crítica, é possível monitorá-la nos quadros de distribuição através de medidores trifásicos nos alimentadores dos quadros, nos circuitos de distribuição para os *racks*, através de medidores monofásicos ou régua de tomada gerenciáveis, ou coletar a medição dos próprios ativos, quando estes disponibilizam a potência demandada da fonte de alimentação nos servidores, *storages*, *switches*, etc. Além destas medições, é recomendável monitorar a temperatura do ambiente, adicionar sensores de temperatura no interior dos *racks* e coletar a temperatura no interior dos ativos, quando disponíveis.

Com estes dados sendo coletados, é possível então projetar um painel de controle que apresente estas informações, que são relevantes quando utilizadas as estratégias de serviços ancilares estudadas no [Capítulo 6](#). Desta forma, o monitoramento da carga crítica desenvolvido é ilustrado na [Figura 80](#).

No monitoramento da carga crítica, a principal grandeza a ser monitorada é a potência total fornecida. Esta informação é importante para o controlador do *data center* verificar quanto de potência esta realizando trabalho útil no sistema. A medida que o sensoriamento do *data center* é aprofundado, as medições de potência e temperatura por *rack* também podem ser obtidas, proporcionando um comparativo entre *racks* e fonte de informação para ponderação se existem *racks* muito ou sub utilizados.

Figura 80 – Painel de monitoramento da carga de TI que será inserido na plataforma DCIM.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Caso os ativos do *data center* disponibilizem suas métricas, também é interessante apresentar ao operador do sistema as métricas de estado, temperatura e potência por ativo. A potência dispendida à carga crítica será importante para o cálculo das métricas PUE e DCIE, comentadas na [seção 2.5](#).

7.2 Monitoramento da refrigeração

O monitoramento do sistema de refrigeração é importante para a utilização das estratégias de corte de carga parcial, com a diminuição da potência demandada total do *data center* em momentos em que a geração de energia diminua e a rede

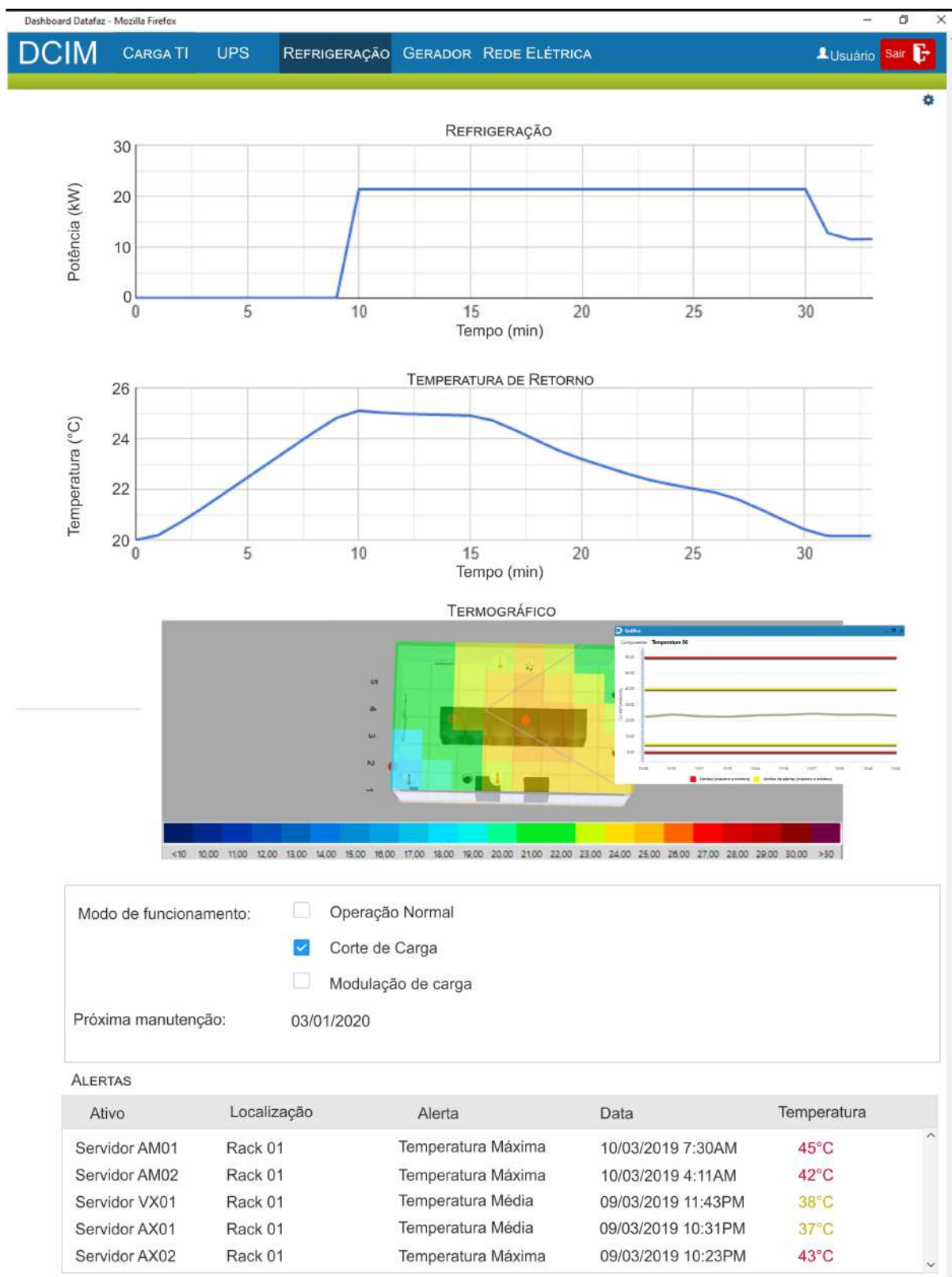
elétrica apresente desequilíbrio, e de modulação de carga, diminuindo a energia demandada em horários de pico da rede elétrica.

Para que o operador do *data center* tenha capacidade de decidir qual estratégia utilizar, e em quais momentos, o painel de controle apresentado na [Figura 81](#) foi projetado, com a intenção de prover em uma única tela as informações mais importantes sobre a condição do sistema de refrigeração. As principais informações disponibilizadas nesta tela são a potência demandada pelo sistema de refrigeração e a temperatura de retorno de ar coletada pelas máquinas. Estas informações são disponibilizadas por sistema de condicionamento de ar de precisão atuais. Através da potência do sistema de ar, o operador conseguirá quantificar o impacto que o corte de carga ou a modulação de demanda poderá efetuar sobre o sistema global. A temperatura de retorno do ar dará a noção do tamanho da margem que o sistema terá para realizar as estratégias sem prejudicar a disponibilidade do *data center*.

Informações adicionais complementares são da temperatura global do ambiente. Através de sensores espalhados pelo ambiente da sala de computadores, é possível obter um termográfico da situação atual de temperatura do *data center*, além do histórico de temperatura em cada ponto do ambiente. Este é importante para identificar focos de calor (*hotspots*) que são provocados por uma distribuição heterogênea da carga no ambiente e podem ser revelados durante a operação em modo de suporte à rede elétrica. Além disso, outras informações como o modo de operação configurado para àquele momento e a data da próxima manutenção são dados pertinentes ao processo decisório.

Por fim, um histórico dos últimos alertas ocorridos no ambiente dá ao operador uma visão da trajetória da temperatura quando as estratégias foram empregadas. Dessa forma, é possível identificar os ativos mais afetados pelas estratégias, para que ações de aumento da vazão de ar refrigerado nestes pontos ou realocação destes ativos para *racks* menos utilizados seja feita. Esta informação tem como objetivo ações de médio e longo prazo para homogenizar a carga térmica do *data center* e prover um ambiente com densidade elétrica e térmica similar em todos os pontos.

Figura 81 – Painel de monitoramento e controle de refrigeração que será inserido na plataforma DCIM.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

7.3 Monitoramento do UPS

O sistema de UPS deverá ser monitorado para as estratégias mapeadas de corte de carga de TI (diminuição da energia demandada em momentos em que a rede elétrica esteja sobrecarregada), modulação de carga (diminuição de demanda em horários de pico e aumento da demanda em momentos em que a rede elétrica esteja ociosa) e fornecimento de energia (em momentos extremos de desequilíbrio entre consumo e geração). Através da infraestrutura de UPS que *data centers* classificados como Tier II ou superior já possuem, a capacidade das baterias pode ser aumentada para que o *data center* auxilie a rede elétrica sem trazer prejuízos à disponibilidade do ambiente.

Para o projeto do painel de controle e monitoramento do UPS, apresentado na [Figura 82](#), foram consideradas como principais métricas a potência de entrada e saída do sistema de UPS. Através destas informações, é possível verificar a potência da carga crítica e a potência demanda do UPS, que pode ser somente a carga crítica (quando as baterias não estão sendo utilizadas) ou a potência da carga crítica em conjunto com a potência das baterias, que pode ser de carregamento ou descarregamento. Abaixo, as informações da bateria foram disponibilizadas, para que o operador consiga identificar se as baterias estão sendo utilizadas e o estado de carga de armazenamento de energia. Nesta seção também foi apresentado um indicador de alerta de bateria no gráfico de estado de carga. Este indicador deverá ser configurado para sinalizar ao operador quando o estado de carga poderá ameaçar a disponibilidade do *data center*, que deverá sempre manter energia armazenada suficiente para suportar a carga crítica em situação de indisponibilidade da rede elétrica e transferência da carga para o sistema de geração reserva. Este limiar deverá ser utilizado para o envio de alertas aos responsáveis pelo *data center*. Abaixo das métricas gerais do UPS e do banco de baterias, as informações do modo de operação configurado para o UPS são apresentados. Primeiramente, o modo de operação do sistema, que pode ser *On-line* com dupla conversão ou *By-Pass*. No modo *On-line*, as baterias permanecem conectadas à carga e os modos de funcionamento de auxílio a rede elétrica são possíveis. No modo *By-Pass*, o UPS não opera com baterias, contudo esse modo é importante para a manutenção dos equipamentos. Abaixo, a indicação da fonte de energia utilizada pelo UPS, que poderá ser a rede elétrica, os geradores reserva ou a bateria. Este campo deverá ser dinâmico para indicar ao operador o estado atual de operação do sistema. Em seguida, o modo de funcionamento que o UPS estará configurado para operar, que poderá ser operação normal, corte de carga ou modulação de carga. Abaixo, a indicação de quantas vezes no dia a bateria foi descarregada e carregada novamente, configurando um ciclo de bateria. Além desta informação, será possível exibir um histórico do número de ciclos de bateria por dia.

Finalmente, a data da próxima manutenção do sistema para garantir que o sistema estará operando em condições ideais. Esta informação é obtida através de cadastro e retirada do módulo de ordens de serviço, já presente no sistema DataFaz.

Figura 82 – Painel de monitoramento e controle de UPS que será inserido na plataforma DCIM.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

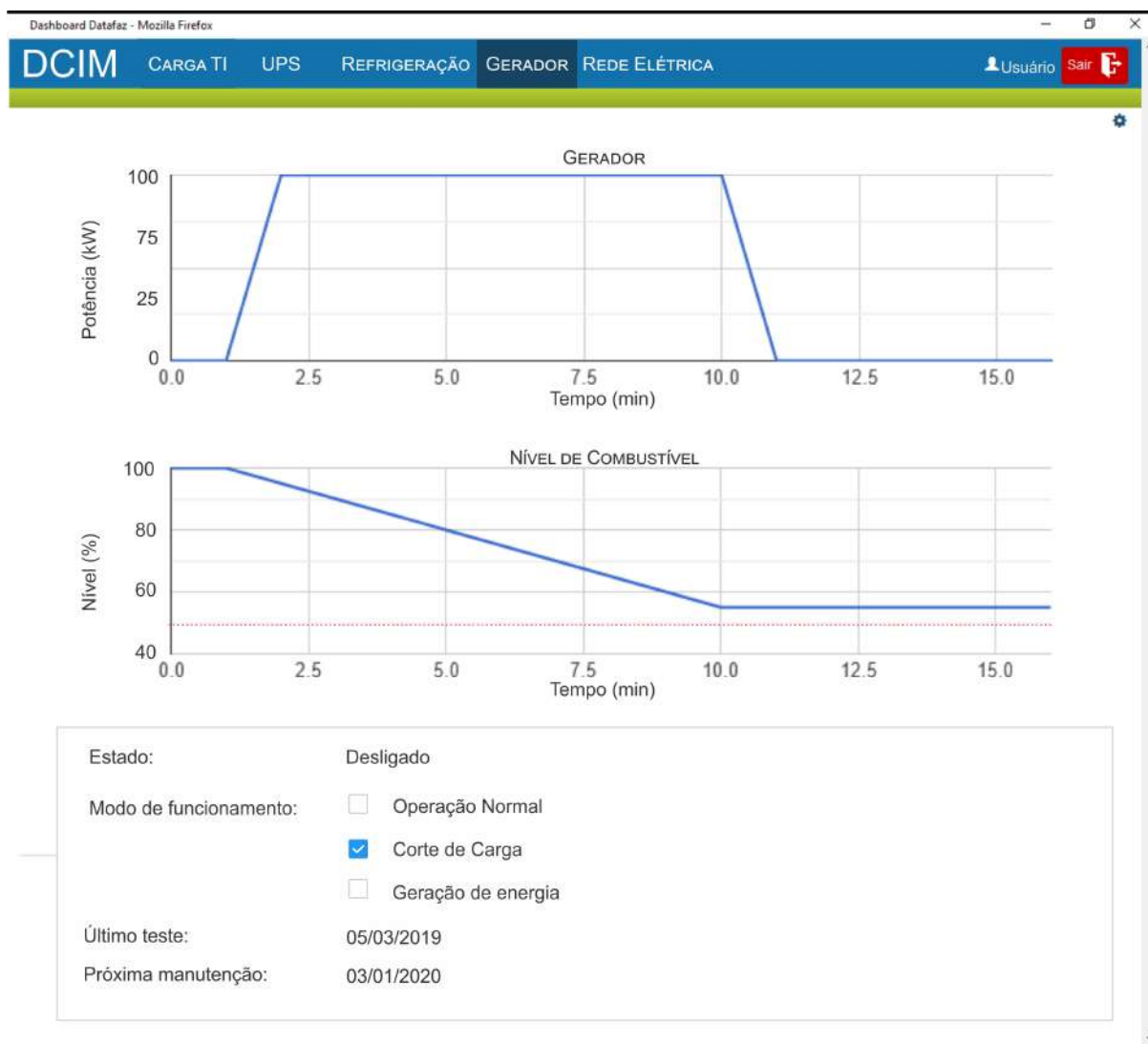
No último campo do painel, deverá ser apresentada as métricas de eficiência do sistema de UPS. Essas métricas apresentadas em forma de histórico e valor absoluto são importantes para indicar ao operador a eficiência com a qual o sistema estará operando.

7.4 Monitoramento do Grupo Moto Gerador

O grupo moto gerador, responsável por manter a energia do *data center* em períodos de indisponibilidade da rede elétrica, também poderá suprir auxílio a rede elétrica através de corte total da carga do *data center* ou fornecendo energia excedente à rede, quando esta apresentar baixa geração de energia em relação a energia demandada. Para isso, alterações na infraestrutura do ambiente e regulamentação serão necessárias, conforme apresentado na [subseção 4.2.5](#).

Para o monitoramento dos geradores de energia reserva, foi projetada a tela apresentada na [Figura 83](#). Nela, a informação principal é a energia fornecida pelo grupo de geradores, que poderá ser a potência demandada do *data center* ou a potência total, para o modo de operação de fornecimento de energia. Este modo poderá ser iniciado por necessidade da rede elétrica ou em momentos de operação agendada dos geradores, que segundo recomendação da [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#), deverá ser realizado periodicamente para garantir que esteja operando corretamente quando houver indisponibilidade de energia na rede. A segunda grandeza apresentada será o nível de combustível disponível no tanque do sistema. Dessa forma, o operador terá dados sobre a autonomia disponível de trabalho do grupo e também poderá configurar um limite inferior de nível de combustível, que indicará ao operador quando é necessário fazer o reabastecimento dos tanques. Abaixo, será apresentado um descritivo do estado atual do gerador, o modo de funcionamento que este estará configurado para operar, a data do último teste de geradores, e a data da próxima manutenção. Dessa forma, o operador terá informação para agendar o próximo teste de operação do grupo moto gerador e a próxima manutenção do sistema.

Figura 83 – Painel de monitoramento e controle do grupo moto gerador que será inserido na plataforma DCIM.

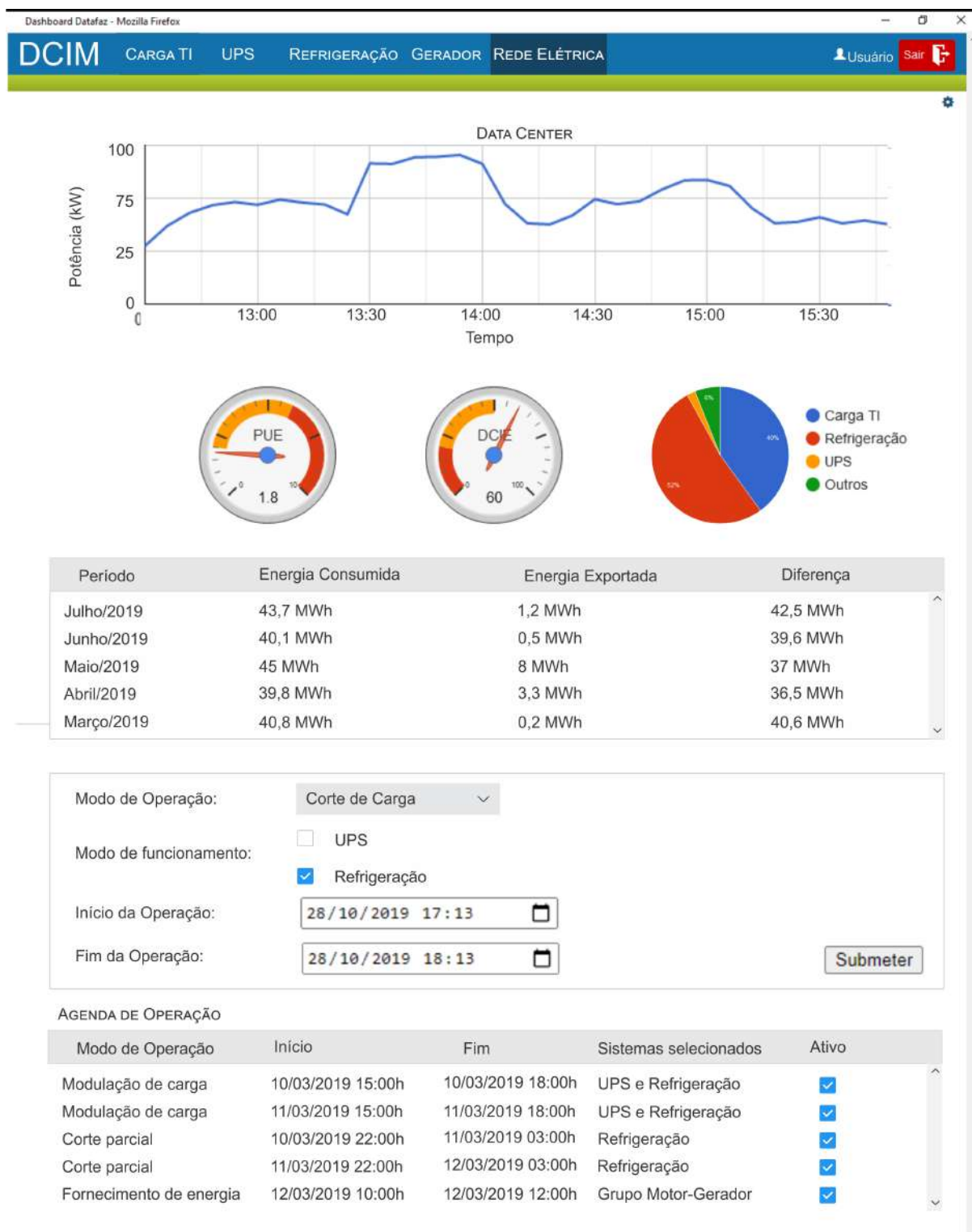


Fonte: Elaboração Própria (2020).

7.5 Monitoramento Geral de energia

O painel de controle geral do sistema trará informações da rede elétrica e do *data center* como um todo e, por fim, dará uma visão geral da operação do *data center* e métricas de eficiência do ambiente. O objetivo desta visão, apresentado na [Figura 84](#), é prover informações gerais do sistema e possibilitar a configuração do modo de operação do *data center*, além de dispor informações para análise da eficiência e dados para o planejamento de melhorias.

Figura 84 – Painel de monitoramento e controle do *data center* que será inserido na plataforma DCIM.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

A primeira informação apresentada será a potência total do *data center*. Esta grandeza deverá ser adquirida por monitoramento no ponto de acoplamento comum do *data center* com a concessionária através de medidores de energia e será positiva

quando o *data center* estiver consumindo energia e negativa caso o *data center* estiver operando em modo de fornecimento de energia. Abaixo, as grandezas de eficiência do ambiente serão apresentadas. Estas métricas, específicas ao ambiente de *data center*, poderão ser calculadas em tempo real devido ao monitoramento da energia de entrada do *data center* e a energia despendida para a carga de TI, e são detalhadas na [seção 2.5](#). Com estas informações, os operadores do ambiente poderão tomar decisões a médio e longo prazo para aumentar a eficiência do sistema. Para isso, o gráfico de energia consumida por subsistema deverá ser levado em consideração, que será calculado com base nas potências coletadas por cada subsistema, para avaliação de quais áreas do ambiente possuem oportunidades de ajuste para que a eficiência do sistema global seja melhorada. Uma tabela de energia consumida e energia exportada também foi inserida neste painel de controle. Com essa tabela, é possível verificar a evolução do consumo e geração do *data center*, e cruzar as informações com àquelas apresentadas no medidor de energia da concessionária. Adicionalmente, é apresentado o campo de agendamento do modo de operação do *data center*, com possibilidade de escolher quais os sistemas serão envolvidos, a data de início e data de fim da operação. Os modos de operação possíveis serão aqueles mapeados na [seção 4.4, Tabela 3](#). Dentre as possibilidades, estarão os modos:

- a) Corte de carga parcial, com participação dos sistemas de UPS, refrigeração, ou ambos;
- b) Corte de carga total, com participação do grupo moto gerador e UPS;
- c) Modulação de demanda, com participação dos sistemas de UPS, refrigeração, ou ambos;
- d) Fornecimento de energia, com participação do grupo moto gerador, UPS ou ambos.

Por fim, uma agenda de planejamento de operação do *data center* é apresentada, em que os operadores podem verificar quais serão os próximos momentos de operação como serviço ancilar do sistema, assim como planejar modos de operação diferentes dependendo da necessidade da rede elétrica e incentivo da tarifa vigente, como por exemplo a modulação de carga para casos de *data centers* com modalidade de tarifa binômica, como comentado na [subseção 4.2.3](#).

7.6 Conclusão

Com os estudos realizados sobre as possibilidades de auxílio da rede elétrica por meio da infraestrutura de apoio do *data center* na [Tabela 3](#) e com as

simulações realizadas no estudo de caso do [Capítulo 6](#), o mapeamento das informações pertinente para o monitoramento e controle do *data center* operando como serviço ancilar foi realizado. Este mapeamento tem a intenção de adicionar funcionalidades a uma ferramenta de gerenciamento de infraestrutura de *data center*, o DCIM DataFaz®.

Para que o DCIM tenha monitoramento e controle total da operação do *data center* voltada ao suporte da rede elétrica através de serviços ancilares, telas de monitoramento foram projetadas. Estas telas, separadas por subsistema, visam proporcionar aos operadores informações suficientes para a tomada de decisão em torno de que estratégia aderir, assim como planejar a operação do sistema dependendo das necessidades da rede e incentivos tarifários.

Primeiramente foi apresentada a tela de monitoramento da carga crítica. Esta visão foi idealizada para trazer as informações de potência consumida pela carga crítica e temperatura de uma forma total e segmentada por *racks* e ativos. Desta maneira, o operador do sistema terá informação sobre a operação da carga de TI, responsável pela geração do trabalho útil do *data center*, que é a o processamento, armazenamento e transmissão de dados. Além disso, terá informação também sobre as condições de temperatura da carga crítica, fator que precisa ser gerenciado para a manutenção da disponibilidade dos ativos.

A segunda visão apresentada diz respeito ao monitoramento do sistema de refrigeração. Este sistema é essencial para a continuidade do funcionamento do *data center*, devido a estes ambientes possuírem grande densidade energética que é dissipada em sua totalidade em forma de calor. Para a tela de monitoramento do sistema de refrigeração, foram adicionadas métricas de potência e temperatura, assim como alertas históricos dos sensores dispostos no ambiente, visto que este sistema participa nas estratégias de corte de carga parcial, total e modulação de carga para auxílio à rede de energia.

Em seguida, o painel de controle e monitoramento do sistema de UPS foi apresentado. Este sistema que, na operação normal do *data center*, tem como objetivo manter a carga crítica disponível enquanto a geração de energia reserva é iniciada em momentos de falta de energia, foi considerado para estratégias de corte parcial, total, modulação de carga e fornecimento de energia para manutenção da disponibilidade da rede elétrica. Nesta visão, foram apresentadas métricas de potência de entrada e saída, assim como potência das baterias e estado de carga. Outras informações importantes como a quantidade de ciclos da bateria e eficiência na conversão de energia foram disponibilizados. Dessa forma, a utilização e manutenção do sistema de UPS poderá ser avaliado quando utilizada a energia armazenada em seu banco de baterias para auxílio à rede elétrica.

O último painel voltado a um subsistema específico do *data center*

apresentado refere-se ao grupo moto gerador. *Data centers* que visam a disponibilidade Tier I ou superior possuem sistema de geração reserva, utilizando geradores a combustível fóssil, com o objetivo de manter o sistema durante indisponibilidade da rede elétrica. No escopo de serviços ancilares, este subsistema foi analisado com intuito de fornecer energia à rede em momentos de desequilíbrio entre geração e demanda. Nesta tela, foram colocadas as grandezas de potência gerada e nível de combustível, além de informações de operação, data do último teste e data de manutenção prevista.

Por fim, uma visão geral do *data center* foi projetada. Nesta visão, além da potência total do *data center*, métricas específicas destes ambientes como o PUE e DCIE e as parcelas de energia consumidas por cada subsistema que compõe o *data center* foram apresentadas. Além disso, a possibilidade de agendamento de modos de operação do *data center* foi concebida, de forma que os operadores possam planejar o funcionamento do ambiente e tenham as informações necessárias para realizar melhorias no ambiente em relação a sua eficiência.

Deste modo, o conceito inicial de implantação de um módulo de gestão da operação do *data center* como serviço ancilar foi projetado, para auxiliar os gestores de *data centers*, adicionar valor a ferramenta DCIM e apresentar formas de aumento de eficiência e redução de custos do *data center* sem a interferir na disponibilidade dos sistemas hospedados no ambiente. O módulo de gestão da operação tem como objetivo inicial prover visibilidade aos gestores e operadores de ambientes de *data center*, e o controle automático destes modos de operação foi reservado a trabalhos futuros, quando a regulamentação e pagamentos por estes serviços estiverem bem desenvolvidos, possibilitando a otimização dos recursos do *data center* de forma matemática.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo investigar como *data centers* podem operar conectados em redes *smart grid* de maneira que auxiliem a resiliência da rede elétrica e identificar as figuras de mérito importantes para adição em uma plataforma de monitoramento DCIM. Com isso, trouxe uma visão geral e abrangente sobre estes dois conceitos e como estes podem interagir de forma a serem beneficiados. *Data centers* são categorizados como ambientes de missão crítica e possuem, como principal métrica de avaliação, sua disponibilidade. Por este motivo, são construídos com a vanguarda da tecnologia existente para manutenção da operação contínua. Por outro lado, com o avanço da tecnologia de geração, fontes renováveis de energia, como solar e eólica, vêm crescendo em proporção na matriz energética mundial. Devido ao caráter estocástico da fonte primária de energia destes novos tipos de geração, o conceito de *smart grid* vem sendo desenvolvido para, dentre suas novas funcionalidades, proporcionar uma rede elétrica resiliente mesmo com alta inserção de fontes renováveis de energia. Devido ao novo desafio de disponibilidade da rede elétrica, buscou-se analisar formas com as quais cargas como *data centers* podem fornecer serviços ancilares que auxiliem a *smart grid* tornar-se confiável.

O [Capítulo 2](#) apresentou a definição de *data centers*, assim como a motivação para a popularização destes tipos de ambientes. Com a evolução da computação e o aumento da dependência da sociedade de sistemas cibernéticos, *data centers* foram criados com o objetivo de manterem os sistemas virtuais disponíveis. Devido à necessidade de operação contínua e ininterrupta, classificações foram criadas para certificar a qualidade destes ambientes e discutidas neste trabalho. Como o principal motivo de parada de operação de *data centers* é a indisponibilidade elétrica, a infraestrutura de suporte a estes ambientes foi apresentada. Além disso, as principais métricas de eficiência destes ambientes, utilizadas para avaliar *data centers* em relação a energia consumida, foram verificadas.

No [Capítulo 3](#), o conceito de *smart grid* foi analisado. A geração convencional de energia elétrica foi projetada considerando grandes unidades de geração de energia, do tipo termo e hidroelétricas, que seriam transmitidas através de longas distâncias aos centros consumidores. Esta configuração, adequada na época da sua implantação, possui limitações como fluxo de potência unidirecional, controle limitado, intervenções manuais e eletromecânicas, entre outros. Com a evolução da tecnologia de geração, monitoramento, proteção e controle de energia, novas formas de geração de energia foram desenvolvidas, visando fontes primárias renováveis que não agredam o meio ambiente. Estas, baseadas em fontes primárias como eólica e

solar, possuem características diferentes da geração tradicional, como a possibilidade de unidades menores instaladas nos centros consumidores e caráter estocástico de energia, sem a inércia de geração proporcionada pelos tradicionais geradores síncronos. O capítulo então apresentou as principais diferenças entre a rede de energia tradicional e inteligente, assim como as novas possibilidades e desafios proporcionados pela evolução da tecnologia empregada no sistema elétrico.

Com o conceito de *data center* e *smart grid* consolidados, o [Capítulo 4](#) visou apresentar as potencialidades de operação da rede inteligente e de cargas como *data center* em conjunto. Através do estudo das estratégias de suporte à rede elétrica como serviços ancilares, controle de demanda, corte de carga e outros, foi verificado como *data centers* poderiam aplicar estas estratégias com o intuito de prover benefícios à resiliência da *smart grid*. Com isso, a regulamentação brasileira deste tipo de serviço foi verificada e os sistemas que fazem parte da infraestrutura elétrica do *data center* foram analisados para identificar como o *data center* poderia prover este serviço e suas limitações, resumidos na [Tabela 3](#). De maneira pontual, a utilização dos recursos de um *data center* para suporte à rede compartilha sua infraestrutura elétrica, o que não contribui para a disponibilidade do ambiente em si. Mas, num contexto em que vários *data centers* adotem esta estratégia, cada um individualmente irá se beneficiar de uma rede elétrica mais estável e resiliente.

Para a validação das hipóteses levantadas, o [Capítulo 5](#) dedicou-se a apresentar a modelagem matemática em uma ferramenta de simulação dos subsistemas que compõem um *data center*, de forma a possibilitar a simulação das operações mapeadas. Neste capítulo, então, foram apresentadas as modelagens da carga crítica, sistema de refrigeração, UPS e baterias e geração reserva que compõem um *data center*. Para validação dos modelos, foi apresentada a simulação da operação normal do *data center* e operação durante indisponibilidade da concessionária de energia, que apresentaram resultados condizentes com a realidade. Com essa simulação, concluiu-se que os modelos concebidos são adequados para os novos cenários que serão propostos, e que trarão resultados relevantes para a validação das hipóteses.

O [Capítulo 6](#) dedicou-se a apresentar o estudo de caso de um *data center* operando nas condições identificadas para suporte à *smart grid*. As estratégias de operação simuladas foram: corte de carga de TI, corte de carga de refrigeração, modulação de carga com auxílio do UPS e sistema de refrigeração e o fornecimento de energia, utilizando como fonte as baterias do sistema de UPS ou os geradores reserva. Através destas simulações, foi possível concluir que o auxílio de *data centers* à resiliência da *smart grid* é viável, e os diversos cenários analisados mostraram diferentes estratégias que podem ser adotadas pelos *data centers*, de acordo com a

necessidade da rede.

No caso de um desequilíbrio em menor escala entre geração e demanda, o artifício de corte parcial de carga é indicado. Ao adotar o corte de carga crítica, verificou-se que a demanda do *data center* foi diminuída em média 74%. Também constatou-se que esse formato é mais indicado por períodos menores, na escala de minutos, porque é diretamente atrelado ao dimensionamento das baterias do UPS e ao seu estado de carga inicial. Para períodos mais longos, foi demonstrado que o corte de carga de refrigeração é mais indicado. Apesar de ter apresentado uma diminuição de demanda na ordem de 20% da carga total do *data center*, este pode ser mantido por mais tempo, dependendo do estado inicial de temperatura do ambiente.

Para desequilíbrios maiores entre demanda e geração, são indicados o fornecimento de energia, que nesse trabalho foram explorados através do UPS e dos geradores reserva. Com as simulações, foi possível concluir que, em situações que necessitem de energia com urgência, o fornecimento pelo UPS é mais indicado. Contudo, esta estratégia é limitada pelo máximo de potência que o UPS poderá fornecer e o dimensionamento das baterias. Para situações em que se necessite maior potência por tempos mais longos, foi verificado que o fornecimento pelo grupo moto gerador é a escolha adequada. Como limitações, observou-se que o tempo de sincronização das máquinas à rede elétrica é maior, mas este método possui vantagens de poder ser prolongado por mais tempo e não demandar da rede após sua utilização, como é o caso do UPS, que precisará recarregar suas baterias.

Por fim, os cenários de modulação de carga apresentados também se mostraram satisfatórios. Com estes cenários, concluiu-se que é possível modular a carga utilizando a energia das baterias do UPS ou a energia armazenada em forma de calor pelo sistema de refrigeração. Além disso, foi observado que o UPS possui maior velocidade em amenizar variações de carga, mas o sistema de refrigeração pode manter a modulação por mais tempo, mas em menor velocidade. Não foram encontradas limitações para a utilização destes cenários combinados e em conjunto, mas este estudo foi reservado a trabalhos futuros sobre o tema.

Com as simulações realizadas, foi possível então identificar as grandezas importantes para o gerenciamento da operação do *data center* provendo auxílio à rede elétrica. Com isso, painéis de controle de carga crítica, refrigeração, UPS, geradores e geral foram projetados para que mostrem aos operadores do *data center* as informações pertinentes ao processo decisório de qual das estratégias adotar, e com isso agregar valores a uma ferramenta DCIM de mercado, discutido no [Capítulo 7](#).

Desta forma, o estudo da operação de *data centers* com a possibilidade de auxílio à rede elétrica foi desenvolvido, com a intenção de trazer um panorama abrangente das possibilidades e limitações do funcionamento neste modo. Os

sistemas mapeados foram modelados em suas características gerais com o propósito de apresentar validação das estratégias identificadas.

Para trabalhos futuros, as seguintes questões permanecem em aberto e poderão ser abordadas:

- O estudo das estratégias verificadas nesse trabalho de forma combinada;
- O estudo dos impactos das reservas de energia no UPS, para diferentes tecnologias de armazenamento possíveis para esses equipamentos e diferentes configurações de conversores de energia;
- O estudo dos impactos nos equipamentos de refrigeração de precisão, assim como a verificação da variação da umidade relativa do ar nos ambientes de *data center*, que não foi abordada neste trabalho;
- A verificação do impacto das estratégias encontradas na disponibilidade do *data center* quando variadas as condições do ambiente;
- Quando regulamentada a remuneração para o fornecimento de serviços ancilares por carga, a otimização dos recursos do *data center* para os diferentes modos de operação apresentados, com base no custo de energia e no fornecimento dos serviços;
- O desenvolvimento de um sistema inteligente que, através do monitoramento das grandezas do *data center* e da variação da remuneração, otimize em tempo real os recursos do *data center*.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 265/2003*. 2003. Citado na página 65.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 235/2006*. 2006. Citado na página 73.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 414/2010*. 2010. Citado na página 69.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 482/2012*. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 73 e 74.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição*. 2017. Citado na página 68.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 792/2017*. 2017. Citado na página 72.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 1 - Introdução*. 2018. Citado na página 68.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *ANEEL e ONS promovem evento sobre serviços ancilares*. 2019. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-e-ons-promovem-evento-sobre-servicos-ancilares/656877?inheritRedirect=falsehttps://forms.office.com/Pages/ResponsePage.aspx?id=_OXeOj6TEUmuG5wv57hESIKZOmBULyJKjHFMfXBeIYRUQIFXSIhNUk80VjRKRUJENkVRTTVX. Acesso em: 30 de setembro de 2019. Citado na página 67.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Bem-vindo à ANEEL!* 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/a-aneel>. Acesso em: 05 de junho de 2019. Citado na página 65.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Tarifa Branca*. 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>. Acesso em: 05 de junho de 2019. Citado na página 71.

AKSANLI, B. Data center peak power management with energy storage devices. *IEEE Internet Computing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 21, n. 4, p. 26–33, 2017. Citado na página 59.

ALI, A. et al. Overview of current microgrid policies, incentives and barriers in the european union, united states and china. *Sustainability*, MDPI AG, v. 9, n. 7, p. 1146, jun 2017. Citado na página 68.

AMAZON. *AWS e sustentabilidade*. 2020. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/about-aws/sustainability/>. Acesso em: 29 de junho de 2020. Citado na página 51.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *Best Practices for Datacom Facility Energy Efficiency*. 2ª. ed. [S.l.], 2009. Citado na página 34.

ANDREA, M. *Data Center Standards: Data Center Size and Density*. [S.l.], 2014. Citado na página 108.

APC. *Why Do I Need Precision Air Conditioning?* [S.l.], 2001. Citado na página 60.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14565: Procedimento básico para elaboração de projetos de cabeamento de telecomunicações para rede interna estruturada*. Rio de Janeiro, 2013. Citado 22 vezes nas páginas 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 41, 47, 59, 60, 83, 86, 93, 96, 109, 110, 114, 118, 126, 131 e 149.

BALODIS, R.; OPMANE, I. History of data centre development. *International Federation for Information Processing*, 2012. Disponível em: <http://dl.ifip.org/db/series/ifip/ifip387/BalodisO12.pdf>. Citado na página 25.

BRONDANI, M. de F. *Modelagem Matemática do Tempo de Vida de Baterias de Lítio Íon Polímero utilizando Algoritmos Genéticos*. Dissertação (mathesis) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, fev. 2015. Citado na página 97.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resposta da Demanda*. 2019. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/resposta_demanda?_afLoop=73799590958279&_adf.ctrl-state=dfv6yoqjx_1#!%40%40%3F_afLoop%3D73799590958279%26_adf.ctrl-state%3Ddfv6yoqjx_5. Acesso em: 05 de junho de 2019. Citado na página 72.

CLP POWER HONG KONG LIMITED. *Smart Grid*. 2016. Disponível em: <https://www.clp.com.hk/en/about-clp/power-transmission-and-distribution/smart-grid>. Acesso em: 07 a 2018. Citado na página 44.

COLOCATION AMERICA. *Lead Acid Batteries vs Lithium Ion Batteries - What's Best for your Data Center?* 2019. Disponível em: <https://www.colocationamerica.com/blog/data-center-batteries>. Acesso em: 01 de outubro de 2019. Citado na página 31.

CUMMINS. *Chaves de Transferência Automáticas*. 2019. Disponível em: <http://power.cummins.com.br/produtos/chaves-de-transfer%C3%A4ncia-autom%C3%A1ticas>. Acesso em: 28 de agosto de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 76 e 100.

CUNHA, L. *UPS: energia sem interrupção*. 2009. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/ups-qualidade-de-energia/a>. Acesso em: 24 de agosto de 2019. Citado na página 96.

CUSTÓDIO, R. dos S. *Energia Eólica para produção de energia elétrica*. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009. ISBN 9788587083098. Citado 2 vezes nas páginas 171 e 172.

DANILAK, R. *Why Energy Is A Big And Rapidly Growing Problem For Data Centers*. 2017. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/alexandrasternlicht/2020/02/21/these-teen-sisters-cooked-bath-bombs-in-their-kitchen-now-its-a-20-million-plus-per-year-business/#6b2249727684>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020. Citado na página 20.

DATA CENTER KNOWLEDGE. *Inside Facebook's Lulea Data Center*. 2018. Disponível em: <https://www.datacenterknowledge.com/inside-facebooks-lulea-data-center>. Acesso em: 25 nov. 2018. Citado na página 40.

DATACENTERDYNAMICS. *Confira os vencedores do DatacenterDynamics Awards Brasil*. [https://www.datacenterdynamics.com/br/not\[s.n.\]](https://www.datacenterdynamics.com/br/not[s.n.]), 2012. Acesso em: 20 de junho de 2020. Citado na página 141.

DAYARATHNA, M.; WEN, Y.; FAN, R. Data center energy consumption modeling: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 18, n. 1, p. 732–794, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 58.

DIESEL SERVICE & SUPPLY. *How a Control System Works within an Automatic Transfer Switch*. 2019. Disponível em: https://www.dieselserviceandsupply.com/Automatic_Transfer_Switch_Controls.aspx. Acesso em: 26 jun. 2019. Citado na página 76.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Reposta da Demanda: Conceitos, Aspectos Regulatórios e Planejamento Energético*. 2019. Citado 4 vezes nas páginas 72, 73, 74 e 75.

ENERGÉTICA, E. de P. *Balanço Energético Nacional (BEN) 2018: Ano base 2017*. [S.l.], 2018. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf#search=ben%202018. Acesso em: 19 abr. 2019. Citado 4 vezes nas páginas 50, 51, 169 e 174.

EVANS, T. *The Different Technologies for Cooling Data Centers*. [S.l.], 2012. Citado na página 87.

FANG, X. et al. Smart grid — the new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 14, n. 4, p. 944–980, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 43, 44, 45, 46 e 48.

GOOGLE. *Google Data Centers: Renewable Energy*. 2020. Disponível em: <https://www.google.com/about/datacenters/renewable/>. Acesso em: 29 de junho de 2020. Citado na página 51.

HASSAN, N. U. et al. Customer engagement plans for peak load reduction in residential smart grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 6, n. 6, p. 3029–3041, nov 2015. Citado na página 60.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. *Contribuição do Instituto Nacional de Eficiência Energética INEE à Audiência Pública Nº 010/2006 para alterar a Resolução Normativa nº 265/03 da ANEEL sobre os serviços ancilares*. 2006. Citado na página 65.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61000-4-4 Electrical fast Transient / Burst Immunity Test*. 2016. Citado na página 96.

KADRI, A.; MARZOUGUI, H.; BACHA, F. MPPT control methods in wind energy conversion system using DFIG. In: *2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*. [S.l.]: IEEE, 2016. Citado na página 174.

KERRAVALA, Z. *What are data centers? How they work and how they are changing in size and scope*. 2017. Disponível em: <https://www.networkworld.com/article/3223692/what-is-a-data-center-how-its-changed-and-what-you-need-to-know.html#:~:text=What%20is%20a%20data%20center,application%2Ddelivery%20controllers%20and%20more>. Acesso em: 20 de junho de 2020. Citado na página 26.

KOSIK, B. *What defines a mission critical facility?* 2015. Disponível em: <https://www.csemag.com/articles/what-defines-a-mission-critical-facility/>. Citado na página 20.

LASSETER, R. H. Smart distribution: Coupled microgrids. *Proceedings of the IEEE*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 99, n. 6, p. 1074–1082, jun 2011. Citado na página 49.

LAWRENCE, A.; ASCIERTO, R. Smart energy for the data center. *Uptime Institute*, p. 16, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 59.

LI, J. et al. Towards optimal electric demand management for internet data centers. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 3, n. 1, p. 183–192, mar 2012. Citado na página 61.

LUO, J.; RAO, L.; LIU, X. Temporal load balancing with service delay guarantees for data center energy cost optimization. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 25, n. 3, p. 775–784, mar 2014. Citado na página 62.

MEGAVOLT ENERGIA. *Paralelismo e Sincronismo entre Grupo Geradores*. 2010. Disponível em: <http://mvemegavolt.com.br/paralelismo-e-sincronismo-entre-grupos-geradores/>. Acesso em: 28 de agosto de 2019. Citado na página 100.

MICROSOFT. *Making data centers part of Europe's sustainable energy transformation*. 2019. Disponível em: <https://blogs.microsoft.com/eupolicy/2019/06/18/data-centers-sustainable-energy-transformation/>. Acesso em: 29 de junho de 2020. Citado na página 52.

MIDEA. *Precision Air Conditioners*. [S.l.], 2012. Citado na página 87.

NGUYEN, K.-K. et al. Powering a data center network via renewable energy: A green testbed. *IEEE Internet Computing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 17, n. 1, p. 40–49, jan 2013. Citado na página 62.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. R: Prentice/Hall do Brasil, 1985. Citado na página 89.

OLIVEIRA, G. A. de. *MICRORREDES EM MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2017. Citado na página 68.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Submódulo 10.10 Gerenciamento da carga*. 2009. Citado na página 62.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Submódulo 14.1 Administração dos serviços auxiliares: visão geral*. 2017. Citado na página 67.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Submódulo 14.2 Arranjos comerciais para os serviços auxiliares*. 2017. Citado na página 66.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Submódulo 21.9 Análise técnica dos serviços Auxiliares*. 2017. Citado na página 56.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Boletim Mensal de Geração Eólica Abril/2019*. 2019. Citado na página 174.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Boletim Mensal de Geração Solar Fotovoltaica Abril/2019*. 2019. Citado na página 170.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Submódulo 10.22 Elaboração do Plano de Corte Manual de Carga no Sistema Interligado Nacional*. 2020. Citado na página 72.

PALENSKY, P.; DIETRICH, D. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 7, n. 3, p. 381–388, aug 2011. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 57.

PAROLINI, L. et al. A cyber–physical systems approach to data center modeling and control for energy efficiency. *Proceedings of the IEEE*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 100, n. 1, p. 254–268, jan 2012. Citado na página 109.

PROCEL EPP. *Manual de Tarificação da Energia Elétrica*. Av. Rio Branco, 53, Centro, Rio de Janeiro, 2011. Citado na página 31.

REBOURS, Y. G. et al. A survey of frequency and voltage control ancillary services—part i: Technical features. *IEEE Transactions on Power Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 22, n. 1, p. 350–357, feb 2007. Citado na página 56.

REDDY, V. D. et al. Metrics for sustainable data centers. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 2, n. 3, p. 290–303, jul 2017. Citado na página 39.

ROWE, M. et al. A peak reduction scheduling algorithm for storage devices on the low voltage network. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 5, n. 4, p. 2115–2124, jul 2014. Citado na página 59.

SAFIUDDIN, M. *Foundations of Smart Grid*. [S.l.]: Pacific Crest, 2013. Citado na página 42.

SERBAN, E.; ORDONEZ, M.; PONDICHE, C. Voltage and frequency grid support strategies beyond standards. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 32, n. 1, p. 298–309, jan 2017. Citado na página 65.

SHORT, J. A.; INFELD, D. G.; FRERIS, L. L. Stabilization of grid frequency through dynamic demand control. *IEEE Transactions on Power Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 22, n. 3, p. 1284–1293, aug 2007. Citado na página 63.

SILVA, J. G. da. *Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização*. 2. ed. [S.l.]: Artliber, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 87 e 108.

SOLAR ENERGY DO BRASIL. *Como funciona a Energia Solar*. 2013. Disponível em: <http://solarenergy.com.br/atendimento/videira-sc/>. Acesso em: 01 de maio de 2019. Citado na página 169.

SPECTO TECNOLOGIA. *DataFaz*. 2019. Disponível em: <https://specto.com.br/datafaz-dcim/>. Acesso em: 01 de agosto de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 141 e 142.

SUSTAINING OUR WORD. *How wind energy works*. 2019. Disponível em: <https://sustainingourworld.com/2014/10/23/wind-energy-works/>. Acesso em: 01 de maio de 2019. Citado na página 172.

TERRA. *Primeiro computador do mundo completa 60 anos*. 2006. Disponível em: <https://sites.google.com/site/historiasobreossitesdebusca/primeiro-computador-do-mundo>. Acesso em: 09 mar. 2019. Citado na página 25.

THE GREEN GRID. *PUE: A Comprehensive Examination of the Metric*. 2012. Disponível em: <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/20-PUE%3A-A-Comprehensive-Examination-of-the-Metric>. Acesso em: 25 nov. 2018. Citado na página 40.

THOMPSON, C. C. et al. Optimization of data center battery storage investments for microgrid cost savings, emissions reduction, and reliability enhancement. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 52, n. 3, p. 2053–2060, may 2016. Citado na página 59.

TINDEMANS, S. H.; TROVATO, V.; STRBAC, G. Decentralized control of thermostatic loads for flexible demand response. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 23, n. 5, p. 1685–1700, sep 2015. Citado na página 60.

TRIGGIANESE, M.; LICCARDO, F.; MARINO, P. Ancillary services performed by distributed generation in grid integration. In: *2007 International Conference on Clean Electrical Power*. [S.l.]: IEEE, 2007. Citado na página 64.

UPTIME. Uptime institute data shows outages are common, costly, and preventable. *Uptime Institute Research*, jul. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 29.

UPTIME INSTITUTE LLC. *Data Center Site Infrastructure Tier Standard*. 2018. Disponível em: <https://pt.uptimeinstitute.com/resources/asset/tier-standard-topology>. Acesso em: 14 nov. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 35.

VANGEET, W. L. O.; TSCHUDI, B. *FEMP Best Practices Guide for Energy-Efficient Data Center Design*. [S.l.], 2011. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/femp/downloads/best-practices-guide-energy-efficient-data-center-design>. Citado 4 vezes nas páginas 33, 34, 40 e 93.

VILLALVA, M. G. *Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: [s.n.], 2015. ISBN 9788536514895. Citado 3 vezes nas páginas 50, 167 e 168.

WANG, Y.; UEHARA, T.; SASAKI, R. Fog computing: Issues and challenges in security and forensics. In: *2015 IEEE 39th Annual Computer Software and Applications Conference*. [S.l.]: IEEE, 2015. Citado na página 22.

WIBOONRAT, M. Risk anatomy of data center power distribution systems. In: *2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*. [S.l.]: IEEE, 2008. Citado na página 29.

WIERMAN, A. et al. Opportunities and challenges for data center demand response. In: *International Green Computing Conference*. [S.l.]: IEEE, 2014. Citado na página 57.

ZHENG, W.; MA, K.; WANG, X. Exploiting thermal energy storage to reduce data center capital and operating expenses. In: *2014 IEEE 20th International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA)*. [S.l.]: IEEE, 2014. Citado na página 61.

ZHENG, W.; MA, K.; WANG, X. Hybrid energy storage with supercapacitor for cost-efficient data center power shaving and capping. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 28, n. 4, p. 1105–1118, apr 2017. Citado na página 60.

ZOTTI, G. D. et al. Ancillary services 4.0: A top-to-bottom control-based approach for solving ancillary services problems in smart grids. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 6, p. 11694–11706, 2018. Citado na página 57.

Apêndices

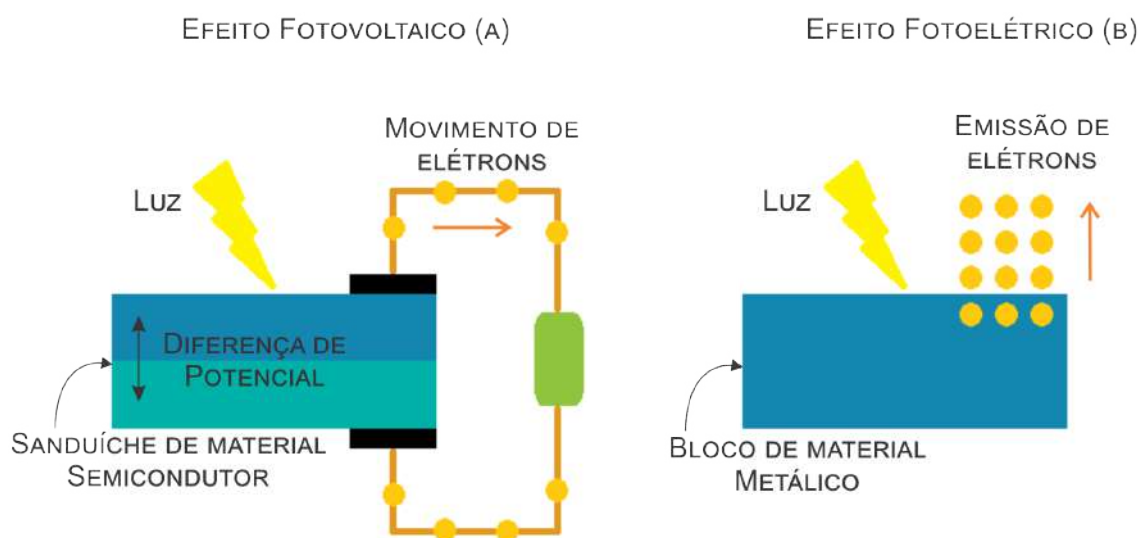
APÊNDICE A – FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEIS

A.1 Geração de Energia Solar

A energia solar é a energia transmitida pela radiação eletromagnética provinda do sol e é a principal fonte de energia do nosso planeta. Essa energia é responsável pelas condições climáticas e pelo desenvolvimento da vida na Terra. Para a geração de energia elétrica, são utilizados os efeitos da incidência de radiação solar: o efeito fotovoltaico e o efeito fotoelétrico.

O efeito fotovoltaico transforma a energia solar em energia elétrica através da separação de cargas elétricas entre placas de material semicondutor. Se um caminho elétrico for criado entre as duas placas, haverá passagem de corrente elétrica, como pode ser observado na [Figura 85 \(a\)](#). Já o efeito fotoelétrico ocorre em materiais metálicos ou não metálicos em estado sólidos, líquido ou gasoso. Este efeito ocasiona a remoção de elétrons do material com a incidência de energia solar, mas não cria tensão elétrica sobre o material, como apresentado na [Figura 85 \(b\)](#). A tecnologia de geração elétrica através de energia solar utilizada comercialmente é baseada no efeito fotovoltaico ([VILLALVA, 2015](#)). As tecnologias empregadas na produção de células fotovoltaicas são variadas, as mais comuns encontradas no mercado são de silício monocristalino, silício policristalino e filmes finos.

Figura 85 – Efeito fotovoltaico e efeito fotoelétrico.

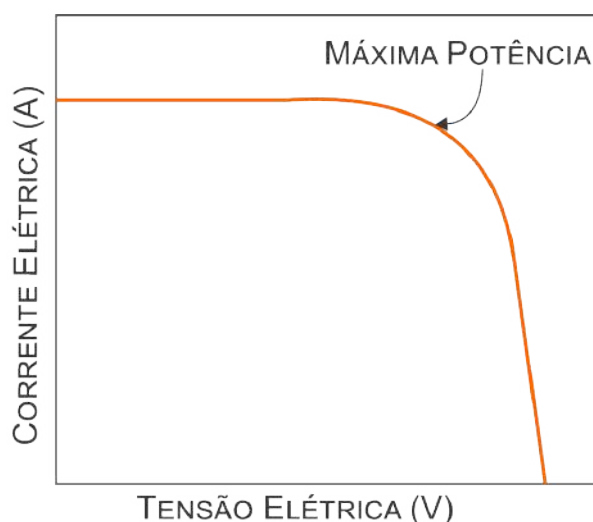


Fonte: Adaptado de [Villalva \(2015\)](#).

Os módulos fotovoltaicos não se comportam como uma fonte de energia

ideal pois a tensão e a corrente geradas são dependentes entre si, e seu ponto de operação dependerá da carga conectada. É possível verificar na [Figura 86](#) a relação característica entre tensão e corrente de um módulo fotovoltaico. Na curva, é possível identificar um ponto de máxima potência, ideal para a operação do painel. A corrente gerada pelo painel depende diretamente da intensidade de radiação incidente. Já a tensão sofre influência da temperatura, e temperaturas mais baixas proporcionam maiores diferenças de potencial nos terminais do painel.

Figura 86 – Relação característica entre tensão e corrente de células fotovoltaicas.



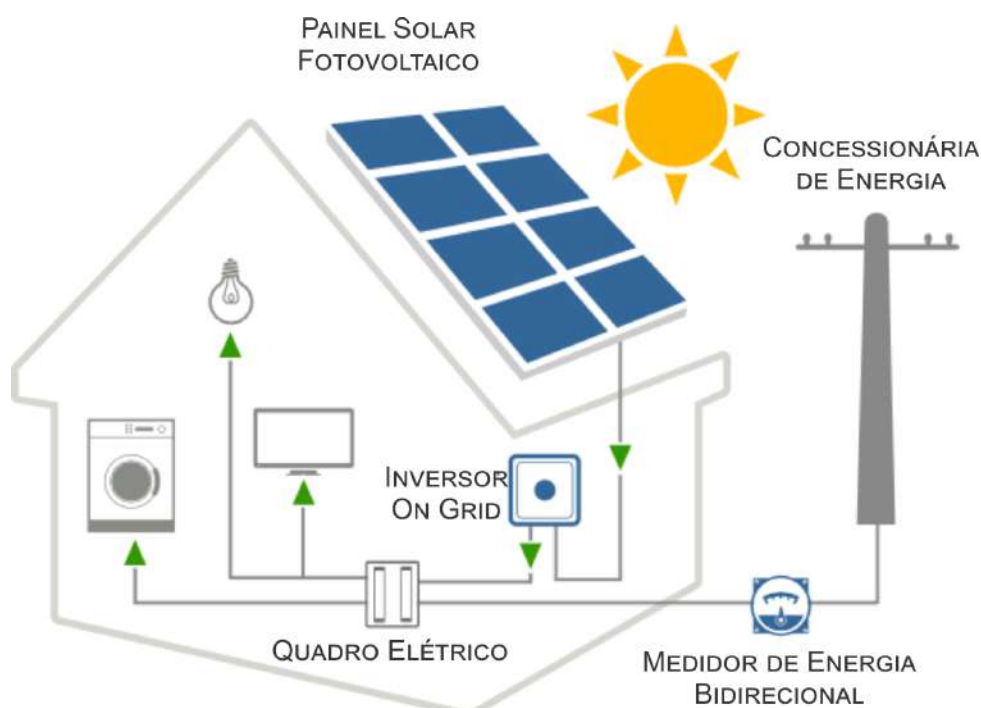
Fonte: [Villalva \(2015\)](#).

As placas fotovoltaicas comercializadas (também denominadas de módulos ou painéis) são um conjunto de células fotovoltaicas. Estas células sozinhas produzem pouca eletricidade, por isso são dispostas em conjuntos conectados em série e paralelo de forma que a tensão e corrente de saída sejam suficientes para o tratamento eletrônico da energia gerada. Como a corrente gerada pela célula fotovoltaica depende diretamente da radiação solar captada, efeitos como sombreamento podem interromper a corrente da célula ou de um conjunto de células caso estas estejam conectadas em série. Por esse motivo, existem placas fotovoltaicas construídas com passagens alternativas de corrente para minimizar este efeito.

A energia fotovoltaica gerada por estes painéis possui característica de corrente contínua. Para a implantação de sistemas de geração através de placas fotovoltaicas, são necessários componentes eletrônicos para condicionamento da energia gerada. O sistema fotovoltaico é composto de um inversor que converte de forma controlada a energia em corrente contínua para alternada, para injeção na rede elétrica, e opcionalmente um sistema de armazenamento de energia por baterias e

um controlador de carga. O controlador de carga é responsável por controlar a carga e descarga da bateria de forma a prolongar a sua vida útil. Em alguns modelos de geradores, o inversor também pode atuar com a finalidade de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - *maximum power point tracking*), utilizado para perseguir o ponto de tensão e corrente em que é possível se obter a máxima transferência de energia do painel. A figura [Figura 87](#) mostra um exemplo de geração residencial, em que a energia produzida pode ser utilizada na própria residência ou injetada na rede elétrica através de elementos bidirecionais como medidores e transformadores.

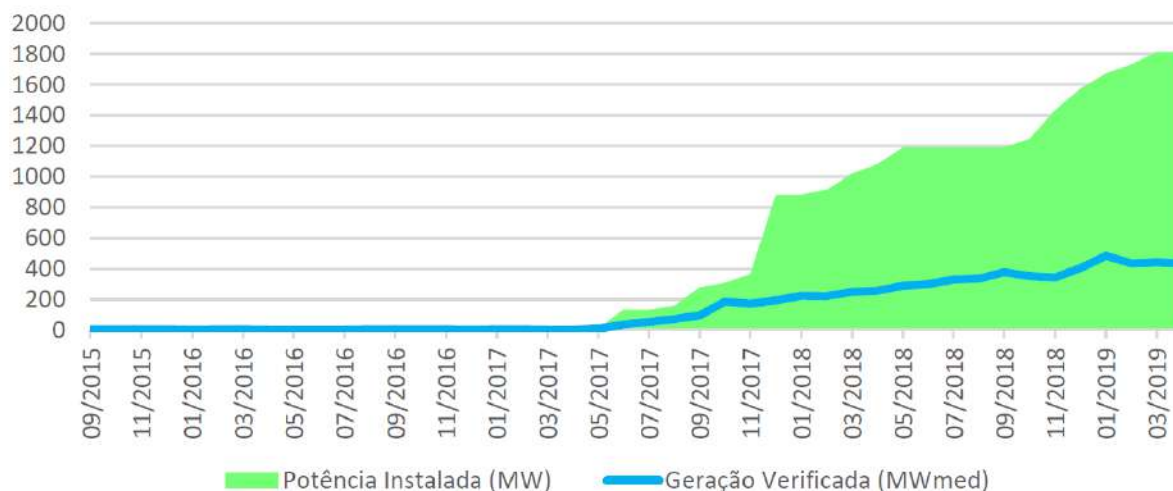
Figura 87 – Residência com produção de energia solar.



Fonte: Adaptado de [Solar Energy do Brasil \(2013\)](#).

As usinas de energia solar estão se tornando cada vez mais populares. No Brasil, o crescimento destas instalações se deu a partir de 2017, e hoje já compõe 0,6% da matriz energética brasileira. A energia solar ainda representa pouco no total da energia instalada no Brasil, mas de 2016 para 2017 seu crescimento foi de 31,9%, se tornando uma forma de geração muito promissora ([ENERGÉTICA, 2018](#)). A [Figura 88](#) apresenta a evolução da potência solar instalada conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

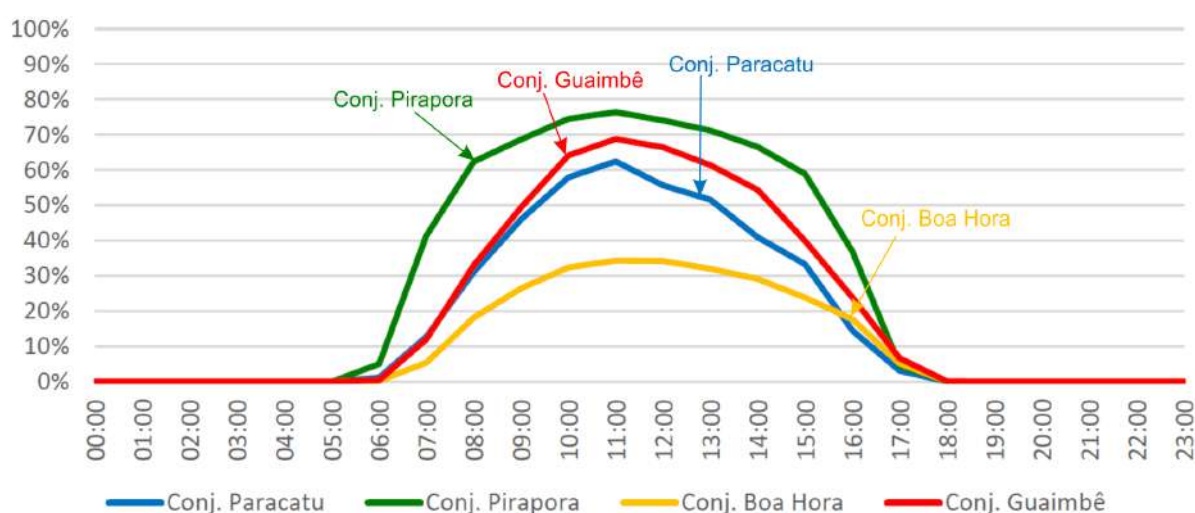
Figura 88 – Evolução da geração e potência instalada de usinas solares no SIN.



Fonte: Adaptado de [Operador Nacional do Sistema Elétrico \(2019b\)](#).

O perfil de geração de uma usina solar é bastante característico. Na [Figura 89](#), é possível verificar o perfil de geração das usinas conectadas ao subsistema Sudeste/Centro-Oeste do SIN no mês de abril de 2019. Este exemplo mostra características de perfil de geração comuns de todas usinas desse tipo, que é o acompanhamento da geração diretamente ligado ao nível de incidência de luz solar na área, que depende da hora do dia.

Figura 89 – Fator de capacidade médio (%) por usina solar - subsistema sudeste/centro-oeste (abril de 2019).



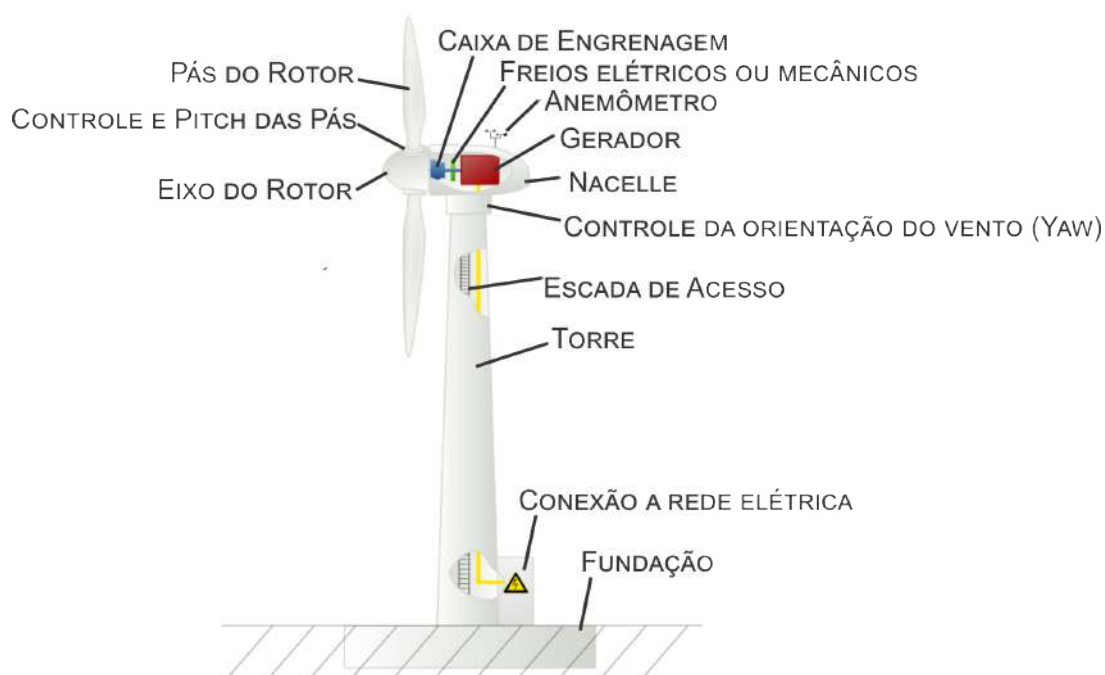
Fonte: [Operador Nacional do Sistema Elétrico \(2019b\)](#).

A.2 Geração de Energia Eólica

A energia eólica diz respeito à energia contida no movimento do ar atmosférico, o vento. Esta energia é conhecida por ser limpa e livre, visto que não depende da extração e queima de matérias primas fósseis com resíduos prejudiciais ao meio ambiente. Além disso, também é dita instantaneamente renovável, já que o vento sopra continuamente sem necessidade de qualquer processo químico para acontecer. Ventos são fenômenos que dependem da articulação de uma série de variáveis para sua ocorrência. Sendo assim, parte-se do entendimento de que o mesmo é a resultante de movimentações do ar na atmosfera terrestre a partir de diferenças de temperatura, pressão, localização geográfica, entre outros. Tais fatores influenciam em sua potência e, por consequência, no projeto de uma usina eólica (CUSTÓDIO, 2009).

A produção da energia elétrica a partir de sistemas eólicos se assemelha em muitos aspectos à produção de energia a partir de potenciais hídricos e mesmo térmicos. O vento nesse caso possui energia cinética que é transformada em energia elétrica com a movimentação de pás em aerogeradores. Aerogeradores são equipamentos geralmente constituídos de 3 pás em torno de um eixo horizontal com um rotor. Ligado ao rotor, há uma caixa de engrenagens para transformação da velocidade de giro e um gerador elétrico. São utilizados anemômetro para medição da velocidade do vento e um conjunto retificador inversor para o condicionamento da energia gerada. Todo este sistema é montado sobre uma torre, conforme [Figura 90](#). As pás giram em torno do eixo gerando energia mecânica para a movimentação do gerador, que produz energia elétrica alternada.

Figura 90 – Aerogerador em detalhes.

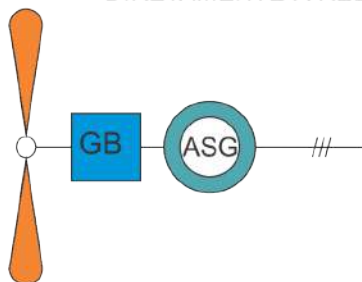


Fonte: Adaptado de [Sustaining Our Word \(2019\)](#).

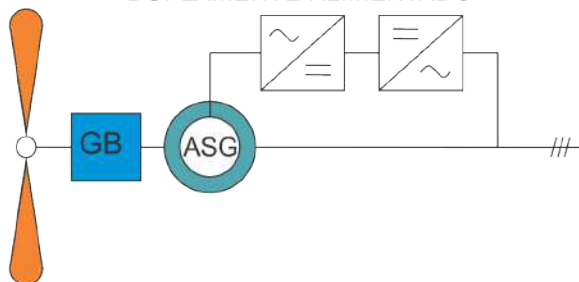
Aerogeradores podem ser construídos com modelos do tipo síncronos ou assíncronos, ligados à rede elétrica por meio de conversores eletrônicos. Dentre os modelos assíncronos, pode-se encontrar geradores de indução ligados diretamente a rede elétrica, com controle de escorregamento, duplamente alimentados e conectados à rede elétrica via conversores de energia. Os geradores síncronos (GS), por sua vez, podem ser conectados também diretamente a rede elétrica ou via conversor de energia. O esquemático de aerogeradores síncronos e assíncronos em suas diferentes configurações pode ser observado na [Figura 91](#). O conceito dos aerogeradores com velocidade variável é o desacoplamento da velocidade de rotação e, consequentemente, da frequência da rede elétrica. Desta forma, o rotor pode funcionar com velocidade ajustada a situação real da velocidade do vento, garantindo o desempenho máximo e a máxima transferência de potência através de controle. Como desvantagem, a complexidade de construção e controle do aerogerador torna-se maior ([CUSTÓDIO, 2009](#)).

Figura 91 – Esquemático de modelos de aerogeradores síncronos e assíncronos.

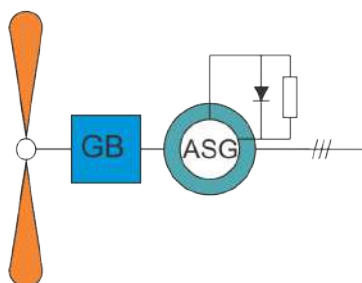
GERADOR DE INDUÇÃO CONECTADO DIRETAMENTE À REDE



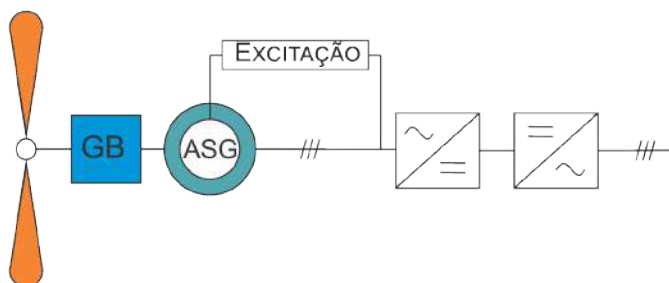
GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO



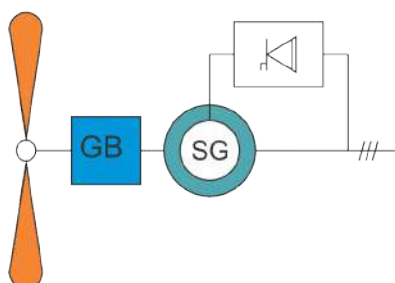
GERADOR DE INDUÇÃO COM CONTROLE DE ESCORREGAMENTO



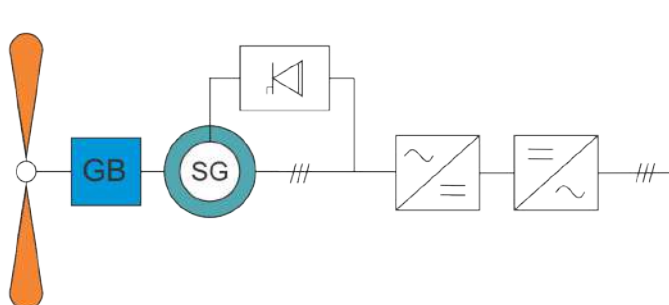
GERADOR DE INDUÇÃO CONECTADO À REDE VIA CONVERSORA



GERADOR SÍNCRONO CONECTADO DIRETAMENTE À REDE



GERADOR SÍNCRONO CONECTADO À REDE VIA CONVERSORA



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Na atualidade, os aerogeradores mais utilizados são do tipo assíncrono e síncrono conectado a rede via conversor de energia. É tendência na geração de energia eólica o emprego do modelo síncrono a ímãs permanentes, com controle de velocidade. Com isso, a frequência do gerador dependerá da velocidade do vento, e a energia gerada deve ser convertida para a frequência nominal da rede para que possa ser injetada, utilizando-se assim de conversores eletrônicos de frequência.

Para que a produção de energia elétrica tenha a máxima performance possível, é necessário que se conheça a velocidade de rotação do aerogerador em que se consegue a máxima potência. Normalmente, o fabricante produz uma curva de

potência em função da velocidade e, a partir desta, este ponto é conhecido. Esta curva pode ser adicionada em algoritmos de controle para rastreamento de máxima potência que buscarão sempre a velocidade ideal do rotor. Esta pode ser modificada a partir do controle de translação e rotação das pás e também do aerogrador como um todo (KADRI; MARZOUGUI; BACHA, 2016).

A produção de energia eólica começou a figurar de forma significativa na matriz energética brasileira a partir de 2012. Desde então, a energia eólica instalada apresenta grande evolução e hoje representa 6,8% do total de energia ofertada. De 2016 a 2017 a produção de energia eólica apresentou crescimento de 26% (ENERGÉTICA, 2018). A Figura 92 apresenta a evolução da geração de energia eólica no Brasil, sendo as usinas do tipo I com programação e despacho centralizados e as usinas do tipo II com programação centralizada e despacho não centralizado.

Figura 92 – Evolução da geração de energia eólica - SIN.



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2019a).

APÊNDICE B – CÓDIGOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

B.1 Operação com corte de carga total de carga

B.1.1 Bloco UPS

```

1 function Pot_Bateria = fcn(Pot_UPS, t_descarga, SOC, k_TI)
2 %#codegen
3
4 %Descarga
5 if (t_descarga == 1)
6     Pot_Bateria = Pot_UPS - Pot_gerador;
7     if (Pot_Bateria < 0)
8         Pot_Bateria = 0;
9     end
10 %Recarga
11 elseif (t_descarga == 0 && SOC < 100)
12     Pot_Bateria = - k_TI * 0.3;
13 %Stand by
14 else
15     Pot_Bateria = 0;
16 end

```

B.1.2 Bloco Gerador

```

1 function Pot_gerador = fcn(Sinal_gerador, Pot_DC, k_TI)
2 %#codegen
3 persistent gerador_on
4 if isempty(gerador_on)
5     gerador_on = 0;
6 end
7
8 Pot_gerador = 0;
9
10 %Subida em rampa
11 if (Sinal_gerador > 0 && Sinal_gerador < 1)
12     Pot_gerador = Sinal_gerador*k_TI;
13     if (Pot_gerador > Pot_DC)
14         Pot_gerador = Pot_DC;

```

```

15         end
16     end
17 % Gerador Ligado
18 if (Sinal_gerador == 1)
19     gerador_on = 1;
20     Pot_gerador = Pot_DC;
21 end

```

B.2 Operação com corte de carga parcial de carga de TI

B.2.1 Bloco UPS

```

1 function Pot_Bateria = fcn(Pot_UPS, Pot_gerador, t_descarga,
    SOC, k_TI)
2 %#codegen
3 persistent recarga_m
4 if isempty(recarga_m)
5     recarga_m = 0;
6 end
7
8 %Descarga
9 if (t_descarga == 1 && recarga_m == 0)
10     Pot_Bateria = Pot_UPS - Pot_gerador;
11     if (Pot_Bateria < 0)
12         Pot_Bateria = 0;
13     end
14 %Recarga
15 elseif (t_descarga == 1 && recarga_m == 1)
16     Pot_Bateria = - k_TI*0.3;
17 elseif (t_descarga == 0 && SOC < 100)
18     Pot_Bateria = - k_TI*0.3;
19 %Stand by
20 else
21     Pot_Bateria = 0;
22 end
23
24 %Limite do estado de carga
25 if (SOC < 50)
26     recarga_m = 1;
27 end

```

B.3 Operação com corte de carga parcial de carga de refrigeração

B.3.1 Bloco Refrigeração

```

1 function Pot_Refri = fcn(Pot_entrada_Refri, Temperatura,
   Sinal_Refri)
2 %#codegen
3     persistent refri_ligado
4     if isempty(refri_ligado)
5         refri_ligado = 0;
6     end
7
8     % Refrigeracao desligada
9     if (Sinal_Refri >= 1 && Temperatura < 25 &&
       refri_ligado == 0)
10        Pot_Refri = 0;
11    % Limite Temperatura
12    elseif (Sinal_Refri >= 1 && Temperatura > 25)
13        refri_ligado = 1;
14        Pot_Refri = Pot_entrada_Refri;
15    % Refrigeracao ligada
16    else
17        Pot_Refri = Pot_entrada_Refri;
18    end

```

B.4 Operação com modulação de carga pelo UPS

B.4.1 Bloco UPS

```

1 function Pot_Bateria = fcn(SOC, Pot_dif, Pot_UPS)
2 %#codegen
3
4     Pot_Bateria = - Pot_dif;
5
6     if (Pot_Bateria > Pot_UPS)
7         Pot_Bateria = Pot_UPS; % Nao pode fornecer
           mais do que a potencia demandada pela carga
           + UPS
8     end
9

```

```

10         if (SOC >= 100)
11             if (Pot_Bateria < 0)
12                 Pot_Bateria = 0; %% Nao pode carregar
                                     se a bateria esta a 100%
13             end
14         elseif (SOC <= 50)
15             if (Pot_Bateria > 0)
16                 Pot_Bateria = 0; %% Nao pode
                                     descarregar se a bateria
                                     esta a 50%
17             end
18         end

```

B.5 Operação com modulação de carga pela refrigeração

B.5.1 Bloco Refrigeração

```

1 function Pot_Refri = fcn(Pot_Dif, Pot_Control, Temp)
2 %#codegen
3
4     Pot_Refri = Pot_Control - Pot_Dif;
5
6     if (Pot_Refri > 0)
7         Pot_Refri = 0; %% Nao pode fornecer
                           energia – somente desligar
8     end
9
10    if (Temp >= 25)
11        if (Pot_Dif > 0)
12            Pot_Refri = Pot_Control; %% Nao pode
                                       diminuir energia/auementar
                                       temperatura – DC Quente
13        end
14    elseif (Temp <= 18)
15        if (Pot_Dif < 0)
16            Pot_Refri = Pot_Control; %% Nao pode
                                       aumentar energia/diminuir
                                       temperatura – DC Frio
17        end
18    end

```

B.6 Operação com fornecimento de energia das baterias (UPS)

B.6.1 Bloco UPS

```

1 function Pot_Bateria = fcn(t_descarga, SOC, k_TI)
2 %#codegen
3 persistent recarga_m
4 if isempty(recarga_m)
5     recarga_m = 0;
6 end
7
8 %Descarga
9 if (t_descarga == 1 && recarga_m == 0)
10     Pot_Bateria = k_TI;
11 %Recarga
12 elseif (recarga_m == 1 && SOC < 100)
13     Pot_Bateria = - k_TI*0.3;
14
15 else
16     Pot_Bateria = 0;
17 end
18
19 % Condicao para recarregamento
20 if (SOC < 50)
21     recarga_m = 1;
22 end

```

B.7 Operação com fornecimento de energia pelo grupo moto gerador

B.7.1 Bloco Grupo Moto Gerador

```

1 function Pot_gerador = fcn(Sinal_gerador, Pot_DC)
2 Pot_gerador = Sinal_gerador*Pot_DC;

```