

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

JOCELEIDE DALLA COSTA MUMBELLI

**CONTROLE FLEXÍVEL DE GERADORES
DISTRIBUÍDOS DE ENERGIA UTILIZANDO CONCEITOS
DE INDÚSTRIA 4.0**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

JOCELEIDE DALLA COSTA MUMBELLI

**CONTROLE FLEXÍVEL DE GERADORES
DISTRIBUÍDOS DE ENERGIA UTILIZANDO CONCEITOS
DE INDÚSTRIA 4.0**

Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Teixeira

Coorientador: Eng. Luiz Fernando Puttow Southier

PATO BRANCO

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

Às 15 horas e 50 minutos do dia 26 de junho de 2018, na sala V108, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, reuniu-se a banca examinadora composta pelos professores Marcelo Teixeira (orientador), Luiz Fernando Puttow Southier (coorientador), Jean Marc Stephane Lafay e Vinicius Pegorini para avaliar o trabalho de conclusão de curso com o título **Controle flexível de geradores distribuídos de energia utilizando conceitos de Indústria 4.0**, da aluna **Jocleide Dalla Costa Mumbelli**, matrícula 01494287, do curso de Engenharia de Computação. Após a apresentação a candidata foi arguido pela banca examinadora. Em seguida foi realizada a deliberação pela banca examinadora que considerou o trabalho aprovado.

Marcelo Teixeira
Orientador (UTFPR)

Luiz Fernando Puttow Southier
Coorientador (UTFPR)

Jean Marc Stephane Lafay
(UTFPR)

Vinicius Pegorini
(UTFPR)

Profa. Beatriz Terezinha Borsoi
Coordenador de TCC

Prof. Pablo Gauterio Cavalcanti
Coordenador do Curso de
Engenharia de Computação

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

RESUMO

MUMBELLI, Joceneide Dalla Costa. Controle flexível de geradores distribuídos de energia utilizando conceitos de Indústria 4.0. 2018. 55f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso 2) - Curso de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. Pato Branco, 2018.

A indústria pode ser considerada o núcleo de subsistência de uma sociedade capitalista, e é acompanhada por uma busca constante por novas tecnologias que consigam melhorar a cadeia produtiva. Contudo, ao falar de indústria é impossível não falar de energia, pois há uma grande dependência entre esses dois fatores e consequentemente a busca por melhoras nas formas de produção de energia também é algo constante. Dessas buscas abriu-se espaço para a geração distribuída de energia, que tem complementado significativamente a geração centralizada. Nesse sentido esse trabalho se propôs a desenvolver uma metodologia de arquitetura descentralizada para o controle de energia elétrica, fazendo uso de conceitos da Indústria 4.0. O sistema foi dividido em três níveis, sub central local (gerador), central local (microrrede) e central global (*Web*). Utilizando a Teoria de Controle Supervisório, foram modeladas plantas para os componentes do gerador e da microrrede, e também definidas e modeladas especificações de controle para coordenar tais plantas. Foram feitas simulações para testar os modelos, e também a síntese do controlador em cima dos modelos. Logo após, foi realizada a tradução dos modelos em linguagem de programação e desenvolvido um *firmware* para cada camada de controle e integrando-o com seu respectivo *hardware*, além de desenvolvida a comunicação multi-nível entre as duas camadas mais baixas e realizados testes do sistema implementado que validaram o correto funcionamento do sistema.

Palavras-chave: Indústria, Energia, Geração Distribuída de Energia, Microrrede, Teoria de Controle Supervisório.

ABSTRACT

MUMBELLI, Joceneide Dalla Costa. Flexible Control of Distributed Power Generators Using Industry 4.0 Concepts. 2018. 55f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso 2) - Curso de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. Pato Branco, 2018.

Industry can be considered the subsistence core of a capitalist society, and it is followed by a constant search for new technologies that can improve the productive chain. However, when speaking of industry, it is impossible not to talk about energy, because there is a great dependency among these factors, and consequently the search for improvements on energy production is also constant. These researches have opened space for the distributed generation of energy, which has significantly complemented the centralized generation. In this sense, this study aimed to develop a decentralized architecture for control of electric energy, making use of Industry 4.0 concepts. The system has been divided into three levels, local sub-central (generator), local central (microgrid) and global central (Web). By using Supervisory Control Theory, plants have been modeled for the generator and microgrid components, as well as defined and modeled control specifications to control these plants. Simulations have been done to test the models, as well as the controller synthesis for these models. Then, the translation of the models in programming language was carried out and a firmware was developed for each layer of control, integrating it with its respective hardware. A multi-level communication between the two lower layers was developed and tests of the implemented system were performed for validation.

Keywords: Industry, Energy, Distributed Energy Generation, Microgrid, Supervisory Control Theory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Diagrama de blocos de uma unidade de geração de energia que utiliza gerador síncrono	17
Figura 2:	Modelo representando a arquitetura do sistema de controle e comunicação	25
Figura 3:	Fluxograma da metodologia de implementação do sistema. . .	30
Figura 4:	Diagramas das plantas do gerador	31
Figura 5:	Diagramas das especificações do gerador	32
Figura 6:	Diagrama do nível de geração de uma microrrede.	34
Figura 7:	Diagrama Operacional de uma microrrede.	34
Figura 8:	Simulação. Plantas do gerador quando este encontra-se desligado.	38
Figura 9:	Simulação. Especificações do gerador quando este encontra-se desligado.	38
Figura 10:	Simulação. Plantas do gerador após receber uma demanda d_1 da microrrede.	39
Figura 11:	Simulação. Especificações do gerador após receber uma demanda d_1 da microrrede.	39
Figura 12:	Simulação. Plantas do gerador após produzindo 33,33% (evento s_1^A).	40
Figura 13:	Simulação. Especificações do gerador após produzindo 33,33% (evento s_1^A).	40
Figura 14:	Simulação. Plantas do gerador após a quebra.	41
Figura 15:	Simulação. Especificações do gerador após quebra.	41
Figura 16:	Simulação. Planta do nível de geração da microrrede.	42
Figura 17:	Simulação. Planta do nível de geração da microrrede ao receber uma demanda de 16,66%.	42

Figura 18:	Simulação. Planta operacional da microrrede quando esta encontra-se desligada.	42
Figura 19:	Simulação. Plantas do diagrama operacional da microrrede quando esta encontra-se ligada.	43
Figura 20:	Simulação. Plantas do diagrama operacional da microrrede quando esta encontra-se estabilizada.	43
Figura 21:	Simulação. Plantas do diagrama operacional da microrrede quando esta encontra-se quebrada.	44
Figura 22:	Diagrama do sistema completo.	45
Figura 23:	Diagrama do pacote de informações transmitido pelo protocolo ModBus.	48

LISTA DE TABELAS

1	Notação para os eventos que compõem o modelo da planta do Gerador	31
2	Notação para os eventos que compõem o modelo da planta do nível de geração	35
3	Notação para os eventos que compõem o modelo da planta operacinal da microrrede.	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
1.2 PROBLEMÁTICA	10
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 Objetivo Geral	11
1.3.2 Objetivos Específicos	11
1.4 JUSTIFICATIVA	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	14
2.1.1 Energia Solar	14
2.1.2 Energia Hidráulica	15
2.1.3 Energia Eólica	15
2.1.4 Comportamento genérico de fontes de energia	16
2.2 SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS	18
2.2.1 Modelagem de SEDs	18
2.2.2 Controle de SED	20
2.2.2.1 Teoria de Controle Supervisório	21
2.3 SISTEMAS EMBARCADOS	22
2.4 INDÚSTRIA 4.0	23
3 METODOLOGIA	25
3.1 APRESENTAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA	25
3.2 MATERIAIS	26
3.2.1 Sub Central Local	26
3.2.2 Central Local	27
3.2.3 Central Global	27
3.3 MÉTODO	27
3.3.1 Sub Central Local	28

3.3.2	Central Local	28
3.3.3	Central Global	28
4	RESULTADOS	30
4.1	MODELAGEM DO SISTEMA EM NÍVEL DE GERADOR	31
4.1.1	Modelagem das especificações do gerador	32
4.1.2	Mapeamento do gerador	33
4.2	MODELO DA MICRORREDE	33
4.2.1	Funcionamento da microrrede	36
4.2.2	Mapeamento da microrrede	37
4.3	CONTROLE GLOBAL	37
5	SIMULAÇÃO	38
5.1	SITUAÇÃO SIMULADA NO GERADOR	38
5.2	SITUAÇÃO SIMULADA NA MICRORREDE	41
6	IMPLEMENTAÇÃO	45
6.1	IMPLEMENTAÇÃO DO GERADOR GENÉRICO DE ENERGIA	45
6.2	IMPLEMENTAÇÃO DA MICRORREDE	46
6.3	COMUNICAÇÃO ENTRE O GERADOR E A MICRORREDE	47
7	CONCLUSÃO	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria pode ser considerada o núcleo de subsistência de uma sociedade capitalista e é acompanhada por uma busca constante por novas tecnologias para melhorar a cadeia produtiva. Dentro desse contexto, os fatores “indústria” e “energia” coexistem: a indústria depende da energia, que é extraída da natureza, o que torna esse recurso natural valioso e eventualmente escasso. Quem domina o desenvolvimento e a exploração desse recurso acaba, em geral, liderando o processo de industrialização (SIMABUKULO *et al.*,), de maneira que a otimização das formas de obtenção de energia ocupam um papel histórico no desenvolvimento da sociedade.

A busca por estratégias que garantam a liderança no processo de industrialização tem estimulado, ao longo dos anos, uma vasta gama de pesquisas. Desde meados do século XVIII, essas pesquisas têm gerado rupturas substanciais sobre a cadeia produtiva, tornando-a cada vez mais eficiente e mais competitiva. Cada grande fase do processo de evolução tecnológica é conhecida como *Revolução Industrial*. A *Primeira* foi caracterizada pelas máquinas e locomotivas a vapor; a *Segunda* teve a eletricidade e o motor a explosão como precursores; a *Terceira*, que perdura até os dias de hoje, mostrou ao mundo a força e a eficiência do trabalho robótico, nanotecnológico e informatizado. No entanto, avanços recentes na área de computação, como *nuvem*, *big data*, *IoT*, etc., têm apresentado à indústria a possibilidade do surgimento de um novo paradigma, pautado na geração altamente flexível, sob demanda, em curto espaço de tempo e a custo reduzido. Tal paradigma é conhecido pelo termo *Indústria 4.0* (I4) ou, também, como *Quarta Revolução Industrial* (SALDIVAR *et al.*, 2015).

A I4 ganhou espaço inicialmente na Alemanha (TRADE&INVEST, 2017) e hoje se espalha por vários países. Inovadora, a I4 busca associar o conceito de sistema embarcado com dispositivos que se comunicam e cooperam via Internet, o que caracteriza os *Sistemas Ciber-Físicos* (SCFs) (SALDIVAR *et al.*, 2015). Nesse modelo, a operacionalização da cadeia produtiva é dada em módulos descentralizados, diferentemente do conceito que se tem hoje de indústria centralizada. Um de seus principais objetivos é conectar máquinas, sistemas e pessoas ao longo de toda cadeia produtiva, permitindo decisões autônomas, integração de processos produtivos, maior eficiência no uso de recursos e interoperabilidade (CAMEIRA *et al.*, 2015).

Um exemplo de processo que se adere naturalmente à ideia de I4 é a geração de energia elétrica. Ainda que não se tenha notícias de trabalhos que aplicam explicitamente o conceito de I4 na geração e na gestão de energia, percebe-se, nos últimos anos, uma tendência para a consolidação da geração distribuída como complementação à geração centralizada. Principalmente devido à disponibilidade de recursos energéticos, ao aumento de demanda e ao paralelismo de fontes de energia, a geração de energia vem deixando de ser centralizada em grandes hidrelétricas, passando a ser complementada de maneira decisiva pela geração em *Pequenas Centrais Hidrelétricas* (PCHs) (DAMASCENO *et al.*, 2014), por painéis com tecnologia *fotovoltaica*, por *geradores eólicos*, etc. Essas características tornam a geração de energia uma área potencial para a aplicação dos conceitos de I4.

1.2 PROBLEMÁTICA

Nos últimos anos, a geração distribuída de energia tem complementado significativamente a geração centralizada, evidenciando vantagens como custo, aproveitamento de recursos naturais, etc (KLIEMANN; DELARIVA, 2015). Ainda assim, a forma como a geração distribuída é estruturada tende a não explorar a capacidade de geração em sua totalidade. Isso porque a fonte geradora possui, em geral, uma visão local das condições de geração, que variam das mais imprevisíveis maneiras, especialmente em função de aspectos climáticos. Dispor de uma visão parcial do processo limita a dinâmica dos geradores em cada contexto, o que impede, por exemplo, que elas cooperem em prol de um objetivo em comum.

Quando a geração é local, a arquitetura para o controle do processo produtivo tende a ser simplificada, já que é encapsulada no mesmo ambiente de geração. Em geração local, o controlador possui uma visão global do sistema e consegue implementar uma lógica eficiente de coordenação e atuação. Diferentemente, quando a cadeia produtiva envolve elementos descentralizados, a arquitetura de controle tende a ser mais complexa, pois passa a incorporar a necessidade de coordenação de agentes locais por meio de uma estrutura global. Nesse caso, cada módulo local, além da camada interna de controle, precisa ainda comunicar-se com um agente de software que dispõe da visão global do processo. Esse agente deve abstrair as características locais, irrelevantes em nível gerencial, e se integrar aos controladores locais, absorvendo as características distribuídas.

Esse trabalho nasce desse contexto, e operacionaliza a geração distribuída

de energia elétrica utilizando conceitos de I4.

1.3 OBJETIVOS

A seguir apresentam-se os objetivos gerais e específicos do trabalho.

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma arquitetura descentralizada para o controle de geração de energia elétrica, que reconheça, em tempo real, informações sobre geração, capacidade e demanda de energia elétrica em um determinado domínio físico, balanceando os fatores de geração conforme a disponibilidade de recursos em cada gerador de energia ativo, em relação à demanda prevista de energia.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O alcance do objetivo geral envolve as seguintes atividades específicas:

- Modelar uma planta que represente o esquema de funcionamento de um gerador de energia, em nível local, usando uma abordagem baseada em eventos;
- Modelar um conjunto de restrições de controle para coordenar a geração de energia em um gerador e integrá-las à planta;
- Propor uma arquitetura de controle intermediário que permita realizar uma ligação entre os eventos observados localmente e a central global;
- Projetar um controlador reativo intermediário para a coordenação de uma microrrede de geração de energia, tomando como base os eventos observados no nível local, integrando o controle baseado em eventos aos conceitos de I4;
- Implementar um enlace de comunicação em nível de protótipo, entre as centrais locais, as centrais intermediárias que controlam as microrredes de geração de energia e sua unidade de controle global, com o objetivo de ilustrar e validar a abordagem;

1.4 JUSTIFICATIVA

Desde a década de 90 o Brasil passou por reformas estruturais no setor elétrico devido a seu grande crescimento econômico. Essas reformas abriram espaço para inserção de fontes alternativas de energia renováveis (SOUSA *et al.*, 2015). Nesse período de reforma, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que apresentou ao país várias propostas inovadoras para o setor elétrico, como por exemplo, a criação de PCHs, que são usinas com potência relativamente pequena, em torno de 1MW a 30MW (MARCHI *et al.*, 2010). Iniciativas como essa indicavam a busca de um processo de geração de energia com uma abordagem descentralizada, capaz de fornecer serviços sustentáveis de tal forma que os danos ambientais sejam mínimos (MARINHO, 2011).

A transição dos sistemas de energia não renováveis para sistemas renováveis ganha espaço diariamente, sendo que os custos dessa transição caíram significativamente nos últimos 30 anos, tornando essa migração cada vez mais viável (MARINHO, 2011). Porém, apesar de promissoras, isoladamente essas fontes alternativas de energia podem não ser maximamente eficientes. Não existe troca de informação entre as fontes geradoras de energia durante o processo produtivo. Cada uma trabalha individualmente, sem o conhecimento da geração das demais, tirando a flexibilidade do processo, o que impede que haja cooperação entre elas e, conseqüentemente, limita a eficiência na geração.

Em meio a essa realidade o conceito de microrredes vem ganhando espaço, sendo utilizado para planejamento e análise da operação de sistemas elétricos modernos. Sistemas esses com geração distribuída, tanto de energias renováveis, quanto convencionais de pequeno porte. Sendo assim, microrredes, podem ser definidas como redes elétricas de baixa ou média tensão, compostas por fontes de geração distribuída, em conjunto com dispositivos de armazenamento e de cargas controláveis (HATZIARGYRIOU *et al.*, 2009).

Nesse contexto, é plausível associar conceitos como o da Indústria 4.0, que traz uma ideia de flexibilidade, descentralização, virtualização e interoperabilidade de processos produtivos. Levando isso em consideração, unir os conceitos de microrrede e I4 buscando melhorar o processo de geração de energia, abriria espaço para a comunicação em tempo real entre as fontes geradoras, permitindo maior flexibilidade, melhor aproveitamento da capacidade de geração individual, divisão da demanda entre as fontes de geração ativas, redução de custos e ainda a possibilidade de aumento

na geração.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Eletricidade acessível e confiável é considerada fundamental para a vida moderna. Apesar de ser conhecida desde a antiguidade, foi durante a *Primeira Revolução Industrial*, com as experiências de Benjamin Franklin, que a sociedade pode perceber quão pouco sabia sobre a energia e quanto ainda era possível evoluir. Foi apenas em 1831 que Michael Faraday desenvolveu o processo de indução eletromagnética, causando uma grande revolução no uso da energia, sendo que, esse processo é usado para geração de energia até hoje (RESEARCH, 2014).

A eletricidade pode ser gerada a partir de diferentes fontes de energia, sendo estas divididas basicamente em: renováveis e não renováveis (AUSGRID, 2017). No primeiro caso, a energia é gerada fazendo uso de recursos que podem ser substituídos ou renovados sem prejudicar o ambiente, como por exemplo a água, o sol e o vento. Já no segundo caso, a geração é pautada no consumo de recursos naturais finitos como o carvão e o petróleo.

A demanda de energia elétrica sofreu um aumento considerável nos últimos anos. Esse aumento foi causado, sobretudo, pela expansão da industrialização e pelo aumento populacional (AYAN; TURKAY, 2017). Quando a demanda por energia cresce, mais energia precisa ser gerada. Logo, integrar a geração de energias renováveis e não renováveis, além de aumentar a produtividade total, proporciona mais confiabilidade ao sistema. Essa confiabilidade é dada pelo fato de que, dificilmente, ambas as fontes de energia estarão indisponíveis ao mesmo tempo, garantindo assim, geração contínua de energia e agregando valor ao sistema (BADAWE *et al.*, 2012).

2.1.1 ENERGIA SOLAR

A energia solar é descrita como a energia obtida do sol, chegando à superfície da Terra na forma de onda eletromagnética (DIENSTMANN, 2009). Presente em praticamente todo o planeta, a luz solar é considerada uma fonte de energia renovável com ótimas perspectivas (DIENSTMANN, 2006).

Na geração de eletricidade por meio da energia solar, duas tecnologias se destacam, o de painéis fotovoltaicos e o aquecimento de fluidos (FEUP *et al.*,). Porém, a energia solar é responsável por menos de 0,1% da matriz elétrica brasileira.

(EMPRESA, 2017)

2.1.2 ENERGIA HIDRÁULICA

No caso da energia hidráulica, sabemos que ela é uma das formas mais antigas de energia de que se tem notícia. Sendo que, a energia hidráulica é responsável por cerca de 68,1 % da matriz elétrica brasileira (EMPRESA, 2017).

Grandes estruturas hidrelétricas implicam em grande geração de energia, porém, ao mesmo tempo, demandam grandes investimentos e causam impactos ambientais. Sabendo disso e pensando em aproveitar o potencial pluvial de determinadas regiões, a implantação de hidrelétricas menores, conhecidas como PCH's pode contribuir para suprir o consumo de energia das cidades, evitando a construção de novas grandes hidrelétricas (GATTE *et al.*, 2010). Várias PCH's juntas podem ter um índice de geração de energia elevado, igualando-se em geração a grandes hidrelétricas.

O aproveitamento da energia hidráulica é feito em sua grande maioria por meio do uso de turbinas hidráulicas, acopladas a um gerador de corrente elétrica. Existem vários tipos de turbinas, como turbinas de Kaplan, Francis e Pelton por exemplo. Essas turbinas têm diferentes características, como queda e vazão d'água, podendo ter uma performance que varia entre 90% e 95% (CAUS, 2014). Entre os aspectos que podem influenciar a geração das usinas estão, a altura efetiva da queda d'água, capacidade ou potência instalada, tipo de turbina empregada, localização e tipo de barragem (ANEEL, 2012).

2.1.3 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é a energia cinética nas massas de ar em movimento. Assim como a hidráulica, ela é usada há dezenas de anos para atividades que envolvem energia mecânica, como por exemplo o bombeamento de água. As primeiras tentativas para a geração de energia por meio dos ventos surgiram no final do século XIX, e somente na década de 1970, devido à crise do petróleo, é que os investimentos foram suficientes para viabilizar o desenvolvimento e a aplicação de equipamentos em escala comercial para a geração de energia eólica (ANEEL, 2012).

A energia eólica provém da radiação solar, pois os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre (BRITO, 2008). Existem vários fatores que influenciam o regime dos ventos e conseqüentemente a geração de energia eólica, entre eles estão a variação da velocidade de acordo com a altura, presença de

obstáculos nas redondezas, diferenças de relevos e rugosidade do terreno (BRITO, 2008). A energia eólica é responsável por cerca de 5,4% da matriz elétrica brasileira (EMPRESA, 2017).

2.1.4 COMPORTAMENTO GENÉRICO DE FONTES DE ENERGIA

Atualmente a maior parte da geração de energia do Brasil vem de fontes hidráulicas (OLIVEIRA *et al.*, 2016). O sistema brasileiro se difere do restante do mundo, pois trata-se de um país com dimensões continentais com um grande número de usinas hidrelétricas espalhadas por todo seu território (LOREY *et al.*, 2015), explicitando o potencial do país para esse tipo de geração. Essa característica acaba determinando também as políticas de gestão de energia, que devem considerar o balanceamento das unidades de geração de forma a potencializar a geração, minimizar custos e, principalmente, observar as condições de cada unidade de geração.

Determinar quais unidades de geração precisam estar ligadas ou desligadas e qual é o respectivo conjunto que minimize custos e potencialize a geração de cada usina, balanceando a geração de forma aceitável, levando em conta o tamanho e a capacidade de geração de cada unidade, é algo complexo e difícil de ser feito. Hoje no Brasil o que se vê em termos de gestão de energia em uma microrrede é essencialmente a distribuição equivalente da demanda de geração entre as unidades geradoras disponíveis. No entanto, estudos mostram que isso não garante que cada unidade geradora opere de maneira ótima, ou próxima ao seu ponto ideal de operação (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Independente do tipo de gerador, a eletricidade é produzida, nas unidades geradoras, convertendo-se a energia mecânica no eixo de saída de um motor, ou mais geralmente uma turbina, em energia elétrica. A conversão de energia mecânica em energia elétrica em usinas térmicas ou hidrelétricas tradicionais é quase universalmente alcançada pelo uso de um gerador síncrono. O gerador síncrono alimenta sua energia elétrica no sistema de transmissão através de um transformador para aumentar a tensão do nível de geração (10-20 kV) para o nível de transmissão (centenas de kilovolts) (MACHOWSKI *et al.*, 1997).

A Figura 1 apresenta um diagrama de blocos geral dos principais componentes de uma unidade genérica de geração de energia que utiliza um gerador síncrono. Destacam-se as grandezas observadas pela unidade de medição e que são utilizadas nas lógicas de controle: V_g tensão terminal do gerador, I_g corrente terminal do

gerador, P potência gerada, f frequência gerada e ω velocidade de rotação do eixo.

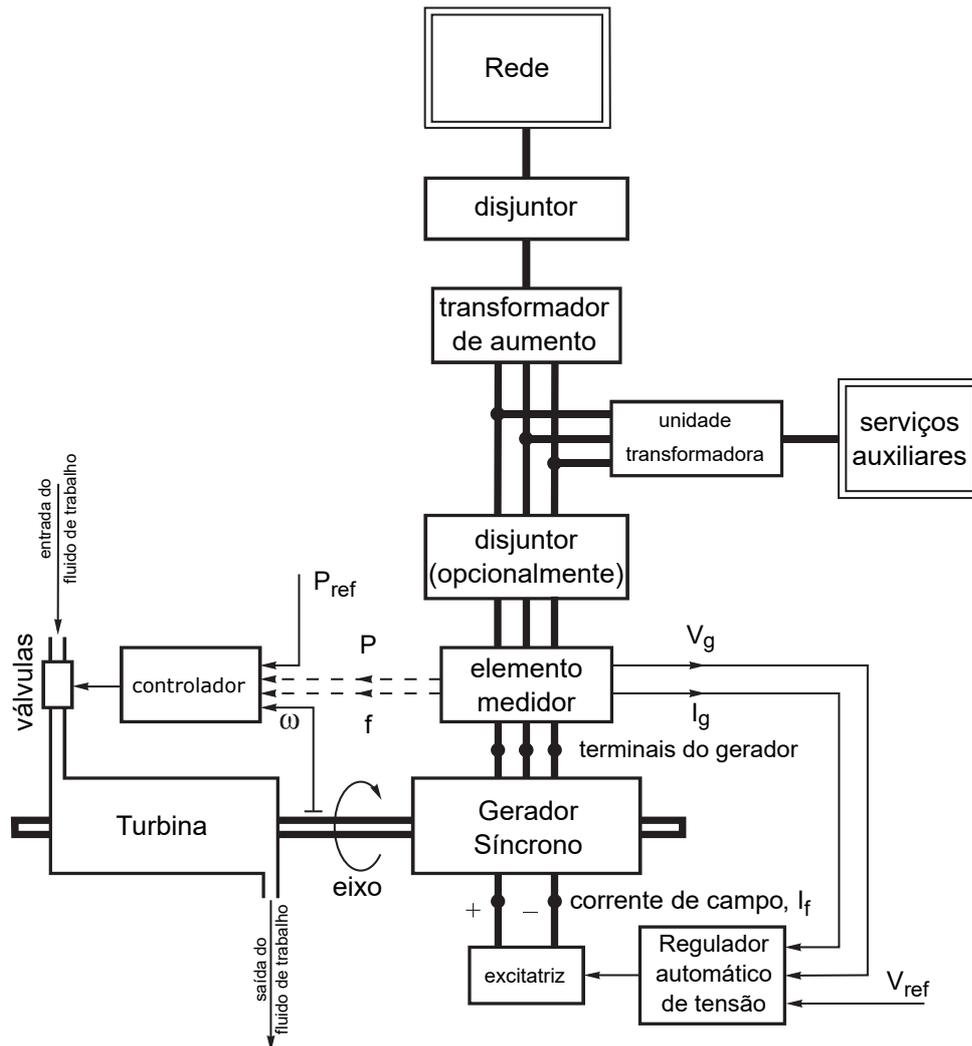


Figura 1: Diagrama de blocos de uma unidade de geração de energia que utiliza gerador síncrono

Fonte: Machowski *et al.* (1997)

Outras informações sobre as unidades de geração também podem ser incorporados à lógica de controle. Fatores econômicos, de eficiência energética, tipo de energia (renovável ou não), capacidade máxima de geração, por exemplo, são importantes para que a política de controle possa ser desempenhada de maneira a considerar o impacto econômico, ambiental e energético. Tais fatores combinados com as grandezas físicas medidas nas unidades geradoras (como potência, tensão e frequência, por exemplo) serão utilizados pelo controlador para tomada de decisão ótima em relação a quais unidades devem estar em operação e em quais condições tal operação acontecerá.

2.2 SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

Existem inúmeras formas distintas para se controlar um mesmo sistema, sendo assim, a escolha do controle utilizado deve ser feita após uma análise detalhada das características do sistema em questão.

Muitos processos industriais têm como característica o fato de serem guiados pela ocorrência assíncrona de eventos, opondo-se aos sistemas guiados pelo tempo. Sistemas que compartilham dessas características são chamados *Sistemas a Eventos Discretos* (SED) (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009). Exemplos de SEDs incluem diversas aplicações industriais como, robótica, manufatura, tráfego, logística, etc.

Assim como outras aplicações, os sistemas de geração de energia também podem ser interpretados como SEDs. E entre suas características discretas e assíncronas pode-se identificar eventos como a quebra de geradores, a falta de recurso natural ou aumento na demanda de energia em um dia específico por algum motivo qualquer. Esses eventos alteram o estado global do sistema nas mais imprevisíveis maneiras, limitando o entendimento, a atuação humana sobre o sistema, e as possíveis abordagens de controle automático.

2.2.1 MODELAGEM DE SEDS

Tecnicamente, um SED é caracterizado por um conjunto discreto e bem definido de estados discretos bem definidos, e por um mecanismo de transição de estados guiado por eventos ocorridos em pontos discretos no tempo. Entre a ocorrência de dois eventos consecutivos quaisquer, um SED permanece em um determinado estado. Quando um evento ocorre, o sistema desloca-se de um estado a outro e aguarda, de maneira não determinística, pela ocorrência de outros eventos.

Enquanto um sistema que evolui pelo tempo é naturalmente representado por equações diferenciais, um SED pode ser modelado por meio de linguagens formais e autômatos finitos (AF) (HOPCROFT *et al.*, 1939). Nesse contexto, lógicas de controle para SEDs podem ser implementadas a partir de operações sobre autômatos. A *Teoria de Controle Supervisório* (TCS), por exemplo, utilizada nesse trabalho, define um método formal para síntese automática de controladores ótimos para SEDs (RAMADGE; WONHAM, 1987). Ela busca efetivar um controle usando um *supervisor*, obtido a partir de um modelo da planta, que é o modelo formal do sistema que se deseja controlar, e suas especificações, que são os requisitos desejados para o sistema sob controle (THISTLE, 2004).

A TCS utiliza *Linguagens Formais* como mecanismo computacional para representar o comportamento de SEDs. Os *eventos* definem a estrutura básica de uma linguagem e são elementos pertencentes a um *alfabeto* finito Σ , para o qual Σ^* denota o conjunto de todas as *strings*, ou cadeias, possíveis construídas com os eventos em Σ , incluindo a *cadeia vazia* ε .

Um subconjunto $L \subseteq \Sigma^*$ é chamado de *linguagem*. O *prefixo-fechamento* de uma linguagem L é definido por $L = \{s \in \Sigma^* \mid st \in L \text{ para algum } t \in \Sigma^*\}$. Uma linguagem L que pode ser reconhecida por uma estrutura computacional finita, como por exemplo uma máquina de estados (explicado a seguir), é chamada de *regular* (LEWIS; PAPADIMITRIOU, 1997). Na indústria, a regularidade de linguagens é de particular interesse pois, nesse caso, a linguagem torna-se adequada para processamento computacional e pode ser representada por estrutura finita, implementável computacionalmente, (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

Um mecanismo formal que permite reconhecer linguagens são os *Autômatos Finitos* (AFs). Segundo (HOPCROFT *et al.*, 1939) um AF pode ser representado como uma quintupla $A = \langle \Sigma, Q, q^\circ, Q^\omega, \rightarrow \rangle$, na qual:

- Σ é um alfabeto finito;
- Q é o conjunto finito de estados;
- $q^\circ \in Q$ é o estado inicial;
- $Q^\omega \subseteq Q$ é o subconjunto dos estados marcados, associados a ideia de tarefas completas; e
- $\rightarrow \subseteq Q \times \Sigma \times Q$ é a relação de transição de estados.

Para dois estados quaisquer $q_1, q_2 \in Q$, denotamos por $q_1 \xrightarrow{\sigma} q_2$ uma transição do estado q_1 para q_2 com o evento $\sigma \in \Sigma$. Por $A \xrightarrow{s} q$ denota-se que uma sequência s é possível em um dado autômato A (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

Sejam A e B dois AFs nos quais, $A = \langle \Sigma_A, Q_A, q_A^\circ, Q_A^\omega, \rightarrow_A \rangle$ e $B = \langle \Sigma_B, Q_B, q_B^\circ, Q_B^\omega, \rightarrow_B \rangle$. A composição síncrona de A e B é definida pelo autômato

$$A \parallel B = \langle \Sigma_A \cup \Sigma_B, Q_A \times Q_B, (q_A^\circ, q_B^\circ), Q_A^\omega \times Q_B^\omega, \rightarrow \rangle,$$

Onde:

- $(q_A, q_B) \xrightarrow{\sigma} (q'_A, q'_B)$, se $\sigma \in \Sigma_A \cap \Sigma_B$;
- $(q_A, q_B) \xrightarrow{\sigma} (q'_A, q_B)$, se $\sigma \in \Sigma_A \setminus \Sigma_B$;
- $(q_A, q_B) \xrightarrow{\sigma} (q_A, q'_B)$, se $\sigma \in \Sigma_B \setminus \Sigma_A$.

A operação \parallel força a ocorrência simultânea dos eventos compartilhados pelos dois autômatos, isto é, as transições são unidas no mesmo evento. Caso contrário, se os eventos não são compartilhados, eles são *intercalados*, ou seja, as transições não são combinadas e o modelo evolui em qualquer ordem (TEIXEIRA, 2013).

2.2.2 CONTROLE DE SED

Usando de composição, é possível modelar individualmente os componentes de um SED de forma simples. Assim, quando esses componentes são modelados por um AF, sua composição dá origem a uma estrutura global que representa o comportamento do sistema sem restrições, ou seja, não há interferências, ações de controle ou coordenações externas atuando no comportamento do sistema. Esse modelo é chamado de *planta* e, devido às características citadas acima, diz-se que apresenta um comportamento de *malha aberta* (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

Na prática, uma planta precisa ser restringida de maneira a se comportar como o esperado durante seu funcionamento. Essa restrição é executada por uma estrutura adicional de modelos a ser associada à planta. Esses modelos também são construídos por AFs e são denominados modelos de *especificação*. Uma especificação pode ser vista como uma ação proibitiva que, quando associada a uma planta por meio de composição síncrona, interfere no comportamento permitido em malha aberta, restringindo-o de acordo com requisitos especificados, atentando às condições de controle desejadas. Isso leva ao chamado comportamento de *malha fechada* (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009). Sendo assim, é possível concluir que controlar um SED implica em obter um modelo que reflete corretamente o comportamento esperado em malha fechada.

Sejam $G = \parallel_{j=1}^m G^j$ e $E = \parallel_{i=1}^n E_i$ dois AF que modelam respectivamente planta e especificações de um determinado SED e sendo a composição $K = G \parallel E$, tal que $L^\omega(K) \subseteq L^\omega(G)$, o modelo do comportamento do sistema em malha fechada. Temos que o modelo K reflete a materialização fiel das ações de controle projetadas, podendo este, ser utilizado para fins de implementação.

2.2.2.1 TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO

Ao usar K como controlador, espera-se que ele apresente algumas características de qualidade para que seja implementado na prática. Dentre elas, espera-se que ele seja controlável e não bloqueante (RAMADGE; WONHAM, 1989). A *Teoria de Controle Supervisório* (TCS) é uma abordagem formal que visa sistematizar a síntese de controladores ótimos para SEDs, ou seja, ela busca obter uma versão de K que incorpore controlabilidade e não-bloqueio, assim definidos.

Definição 1 Um autômato $A = \langle \Sigma_A, Q_A, q_A^o, Q_A^\omega, \rightarrow_A \rangle$ é dito ser não bloqueante se

$$A \xrightarrow{s} q \quad \text{implica} \quad q \xrightarrow{t} q'$$

para algum $q' \in Q_A^\omega$.

Diferentemente, a controlabilidade trata da impossibilidade de atuação em alguns eventos devido ao fato de sua não controlabilidade direta. Isso pode ser visto em exemplos como a quebra de uma máquina, a chegada de um pacote e a conclusão de uma operação. Esses eventos são involuntários e devem ser livres para ocorrer a qualquer momento.

A fim de incorporar a ideia de controlabilidade na síntese de um controlador, a TCS particiona o conjunto de eventos em $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_u$, onde Σ_c contém os *eventos controláveis*, os quais a ocorrência pode ser evitada na planta, e Σ_u contém os *eventos não controláveis*, os quais não podem ser diretamente evitados. A controlabilidade pode então ser definida como segue.

Definição 2 Sejam $G = \langle \Sigma_G, Q_G, q_G^o, Q_G^\omega, \rightarrow_G \rangle$ e $E = \langle \Sigma_E, Q_E, q_E^o, Q_E^\omega, \rightarrow_E \rangle$ dois AF. E é dito ser controlável em relação a G se, para todo $s \in \Sigma^*$ e todo $\mu \in \Sigma_u$, se

$$E \xrightarrow{s} q_E \quad \text{e} \quad G \xrightarrow{s} q_G \xrightarrow{\mu} q'_G$$

então existe um estado $q'_E \in Q_E$ tal que

$$E \xrightarrow{s} q_E \xrightarrow{\mu} q'_E.$$

A partir da Def. 2, a TCS implementa a operação matemática que calcula o chamado *supervisor ótimo*, denotado por $\text{sup}\mathcal{C}(K, G)$, o qual é modelado por um autômato S , representando uma versão de K que considera a impossibilidade de desativar eventos em Σ_u .

O cálculo de S é uma operação iterativa conhecida como síntese de controle. Ela remove de K os chamados *maus estados*, que são estados dos quais eventos não-controláveis estão desabilitados. De maneira prática, $\text{supC}(K, G)$ representa o comportamento minimamente restritivo que se pode implementar por meio de um supervisor S sobre G , obedecendo a uma especificação K . Ainda, se S for não bloqueante, então diz-se que é uma solução de controle *ótima* para G .

Depois de sintetizado um controlador *ótimo* para a planta do sistema, garantindo que as especificações são respeitadas e o sistema se comporta como o projetado, a atenção deve se voltar para outras questões, como definir uma maneira de implementar fisicamente esse controle, bem como integrar vários controles, de diferentes sistemas, com funções semelhantes ou não. Implementar e acompanhar o comportamento conjunto de *supervisores ótimos*, otimizando o processo que está sendo controlado, é uma atividade complexa que impõe limitações físicas e tecnológicas, as quais são exploradas na sequência.

2.3 SISTEMAS EMBARCADOS

A evolução tecnológica observada nos últimos anos se caracteriza pela miniaturização dos sistemas computacionais. Ao contrário do que se tinha há alguns anos, os equipamentos eletrônicos têm se tornado portáteis, mantendo ou até superando a capacidade computacional de equipamentos maiores. Essa miniaturização simplifica a integração desses sistemas com dispositivos variados, como TVs, carros, ar condicionados, lâmpadas, etc.

Tendo em vista que diferentes formas de tecnologia tem se espalhado pelos mais diversos dispositivos, abre-se espaço para os conceitos de computação ubíqua ou computação pervasiva, indicando que a tecnologia está, ou pode estar, em qualquer lugar, ao mesmo tempo, e ainda ser imperceptível ao usuário. A viabilidade desses sistemas passa, sobretudo, por progressos na área de *Sistemas Embarcados* e tecnologias de comunicação (MARWEDEL, 2017).

Um Sistema Embarcado é um sistema microprocessado no qual o computador é completamente encapsulado ou dedicado ao dispositivo ou sistema que ele controla (EMBARCADOS, 2013). Esses sistemas relacionam o uso de *Hardware* e *software* integrados em dispositivos com objetivos específicos, sendo que essa objetividade difere de um Sistema Embarcado de um computador de propósito geral (LI; YAO, 2003).

Um Sistema Embarcado busca atuar sobre um problema, ou seja, busca controlar processos. Um projeto de Sistema Embarcado pode ser dividido basicamente em três partes, sendo elas: uma unidade de processamento, que vai tomar as decisões, tratar os eventos e realizar os cálculos; uma memória para armazenar os dados e instruções referentes às operações da unidade de processamento; e os periféricos que são a interface da unidade de processamento com o mundo externo, sendo eles que trazem ou enviam informações (DELAÍ, 2013).

Os Sistemas Embarcados são limitados ao controle de um único processo, porém, nos últimos anos houve uma busca por tecnologias que agreguem interação entre os processos, para que eles consigam cooperar entre si, otimizando a geração e dando origem a processos inteligentes. A busca por tecnologias que atendam a essa necessidade de interação entre os processos, deu origem a um conceito inovador, conhecido como Indústria 4.0, ou I4. Sua base propulsora são os *Sistemas Ciber-físicos*, que são uma evolução dos Sistemas Embarcados que, além de implementarem controle, implementam também a comunicação entre diferentes processos.

2.4 INDÚSTRIA 4.0

Recentemente, progressos nas áreas de sistemas de monitoramento acessíveis remotamente, sistemas de comunicação e computação de alto desempenho, elevaram a geração industrial para um novo patamar, conhecido como *Indústria 4.0*, ou I4 (HERNANDEZ *et al.*, 2017). De origem alemã e composta pela combinação de conceitos como Sistemas Embarcados em Rede, *Sistemas Ciber-Físicos* (SCF), Internet das Coisas (IoT) e *Internet of Services* (IoS), a I4 traduz processos de geração convencionais para o contexto de processos de produção inteligentes, flexíveis, reconfiguráveis, e personalizáveis (SALDIVAR *et al.*, 2015).

Considerada uma iniciativa de grandes proporções, a I4 visa uma mudança dos modelos de geração centralizados para os descentralizados, trazendo uma inversão da lógica do processo de geração existente nos dias de hoje. Entre seus princípios estão os conceitos de interoperabilidade, descentralização, orientação a serviços, capacidade em tempo real e virtualização (SALDIVAR *et al.*, 2015). A I4 tem crescido tanto que já existem iniciativas de propósito similar ao redor do mundo, como é o caso da *Internet Industrial* trazida pela *General Electric* à América do Norte. Sua base técnica é muito semelhante à I4, porém sua aplicação é mais ampla que a geração industrial, incluindo por exemplo, redes elétricas inteligentes (DRATH; HORCH, 2014).

A I4 é impulsionada principalmente pelos SCFs (DRATH; HORCH, 2014), que são sistemas distribuídos e podem ser vistos como sistemas heterogêneos conectados através de redes, sendo que, geralmente são associados ao conceito de IoT. Os SCF são capazes de monitorar os processos físicos, criar uma cópia virtual do mundo físico e tomar decisões descentralizadas. Seu uso crescente e a maior disponibilidade de dispositivos distribuídos em sistemas industriais usando conceito de CSF, pode mudar significativamente os sistemas de automação, tornando-os mais autônomos, dinâmicos e produtivos (HARRISON *et al.*, 2016). Nesse trabalho, esse conceito é aplicado sobre a geração distribuída de energia, conforme explorado na sequência.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento e integração de um sistema de controle genérico para geradores distribuídos de energia.

3.1 APRESENTAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA

O sistema proposto consiste basicamente no desenvolvimento de três unidades de controle para um sistema de geração de energia genérico, sendo elas: uma Sub Central Local (SCL), uma Central local (CL) e uma Central Global (CG). O sistema pode ser visto na Figura 2.

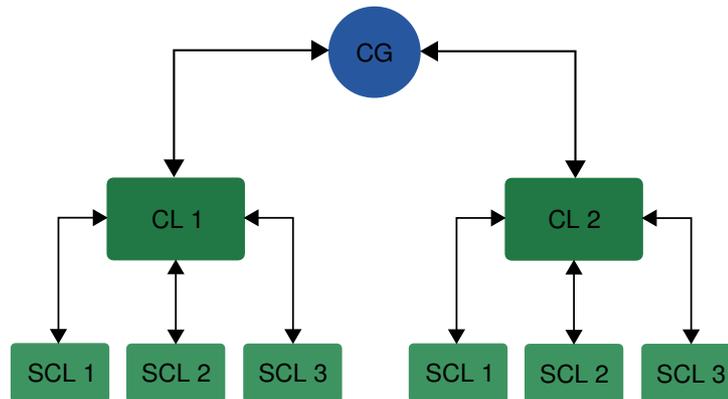


Figura 2: Modelo representando a arquitetura do sistema de controle e comunicação

Fonte: Autoria Própria

As SCLs são capazes de analisar informações como frequência, tensão e potência, referentes ao comportamento dos geradores de energia, e repassa-las ao nível superior (CL) para que sejam tratadas. Além disso, também são capazes de agir sobre os geradores de energia, gerando modificações em seu comportamento caso solicitado por sua CL.

As CLs implementam um controle que coordene a geração de energia de uma microrrede de geradores de energia. Esse controle baseia-se nos eventos reportados pelas SCLs, e nas solicitações repassadas pela CG e, são capazes de controlar e coordenar a geração de energia de cada gerador de energia ativo pertencente a sua rede.

A CG por sua vez, implementa uma interface de comunicação de fácil entendimento e intuitiva com o usuário. Essa interface permite acesso remoto a informações

das CLs conectadas, permitindo assim, que sejam feitas alterações na geração total de energia do sistema, tal como, permitir também que o usuário verifique informações de histórico de geração, demanda, etc. O sistema como um todo funciona da seguinte maneira:

- A CG repassa às suas CLs o total de energia que deve ser produzido;
- As CLs verificam as informações sobre o estado atual dos geradores de energia através de suas SCLs;
- Tendo as informações tanto da CG, quanto das SCLs as CLs executam uma ação de controle sobre as SCLs, solicitando ou não mudanças de comportamento a elas;
- As CL enviam a ação de controle para as SCLs, que executam as mudanças nos geradores de energia caso necessário.

3.2 MATERIAIS

Os seguintes materiais foram utilizados no projeto:

3.2.1 SUB CENTRAL LOCAL

Para o desenvolvimento da SCL foram necessários:

- Microcontrolador para coletar e processar os dados vindos dos sensores que vão definir o estado de funcionamento de cada gerador de energia. Esse microcontrolador troca informações com a CL de forma cabeada, sendo assim, o microcontrolador usado na SCL não realiza tarefas muito complexas, mas deve ser estável e confiável. Nesse trabalho foi utilizado o kit MSP-EXP430G2 *LaunchPad* MSP430G2553 desenvolvido pela Texas Instruments.
- Uso de RS485 para comunicação entre a SCL e a CL.

3.2.2 CENTRAL LOCAL

Para o desenvolvimento da CL foram necessários:

- Ferramenta de modelagem Supremica (AKESSON *et al.*, 2017), utilizada para o desenvolvimento da lógica de controle e as operações de síntese do controlador.
- Computador para troca de dados tanto com a SCL quanto com a CG, sendo que este é responsável por executar a lógica de controle desejada de acordo com as informações que lhe são disponibilizadas. O computador utilizado na CL realiza atividades complexas, sendo que sua capacidade de processamento deve ser elevada. Porém, devido a miniaturização dos Sistemas Computacionais é desejado que a CL seja pequena e de fácil implantação. Pensando nisso foi utilizada uma Raspberry PI 3 Modelo B, que é um minicomputador portátil, com características de microcontrolador, além de rodar um sistema operacional próprio, seu poder de processamento é elevado.

3.2.3 CENTRAL GLOBAL

Por fim, para o desenvolvimento da CG serão necessários:

- Um servidor para armazenamento de informações relacionadas às produções da microrrede de geração, permitindo acesso remoto, tendo uma interface com usuário que permita o acesso a informações sobre a geração de energia em tempo real de cada microrrede de geração, assim como disparar comandos que venham a alterar essa geração total de acordo com a demanda.
- Comunicação sem fio WIFI fazendo uso do Protocolo MQTT para troca de informações entre a CL e a CG.

3.3 MÉTODO

O desenvolvimento do sistema proposto nesse trabalho foi dividido em três etapas: uma SCL, uma CL e uma CG. Nas subseções a seguir é descrita a metodologia de desenvolvimento de cada etapa do sistema.

3.3.1 SUB CENTRAL LOCAL

A SCL foi desenvolvida de forma a centralizar os dados de múltiplos sensores que tem a função de indicar o funcionamento e o comportamento de um gerador de energia real, sendo que, cada gerador é monitorado por sua própria SCL.

Os dados dos sensores são adquiridos por um microcontrolador que tem função de coletar, processar e repassar esses dados para uma segunda central com uma visão mais abrangente do sistema, nesse caso a CL.

3.3.2 CENTRAL LOCAL

A CL foi desenvolvida para centralizar e controlar os dados vindos das múltiplas SCL, criando uma microrrede com os dados repassados pelas SCLs. Esses dados são conectados à CL fisicamente por meio de fios, através do protocolo de comunicação ModBus com as especificações de meio físico definidas pelo padrão RS-485. A CL pode ser configurada para realizar aquisição de dados de forma periódica de suas SCLs conectadas, enviando esses dados para a CG.

Um controle foi implementado na CL, sendo que, nas etapas de modelagem, síntese e implementação do controlador, o método de desenvolvimento foi pautado em conceitos da Teoria de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos (RAMADGE; WONHAM, 1987), estendida com conceitos provenientes das arquiteturas de software baseadas em serviços. O software utilizado para realizar a modelagem da lógica de controle foi o Supremica.

A CL estabeleceu uma conexão com a CG por meio de comunicação wifi. A transmissão dos dados referentes a capacidade de geração da microrrede de geração pode ser efetuada quando solicitada pela CG, ou configurada para ser feita de maneira automática em determinados períodos de tempo.

3.3.3 CENTRAL GLOBAL

A CG é uma maneira de facilitar o acesso a informações das CLs e das SCLs. Essas CLs podem ser distantes umas das outras, tornando a implementação de uma comunicação cabeada entre elas e a CG praticamente inviável, sendo assim, uma comunicação sem fio é ideal para a o envio de informações que permitam o monitoramento da geração de energia das CLs e das suas SCLs.

A CG implementa uma interface web com os usuários, onde é possível verifi-

car a geração individual e coletiva de cada gerador de energia através das informações passadas pelas CLs. Esses dados também podem ser guardados em um banco de dados MySQL para que se possa consultar um histórico de geração.

Por fim, testes práticos foram realizados para validar o funcionamento do sistema.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os principais resultados desse trabalho, consistindo de um conjunto de atividades que vão desde a modelagem do sistema, seus requisitos, até as etapas de implementação e integração em hardware. Como tal conjunto de atividades é numeroso e cuja evolução sequencial pode não ser tão intuitiva, propõe-se a seguir uma metodologia de implementação que pode ser seguida nos casos em que se deseja reconduzir e replicar os experimentos e resultados desse trabalho. A metodologia proposta segue o fluxograma apresentado na Figura 3.

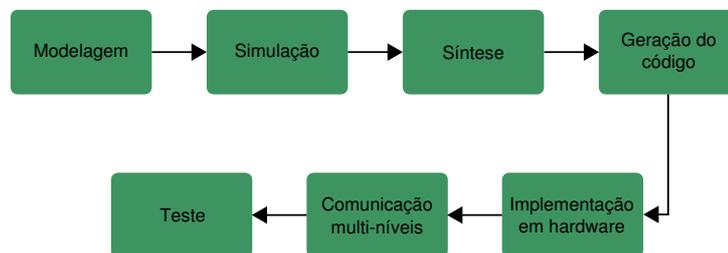


Figura 3: Fluxograma da metodologia de implementação do sistema.

Fonte: Autoria Própria

Na primeira etapa foram modelados os componentes do gerador e da microrrede, bem como definidas e modeladas especificações de controle para coordenar as plantas.

A segunda etapa consistiu na simulação dos modelos propostos anteriormente. Essa simulação se deu por meio da aplicação de um exemplo prático de um sistema de geração composto por 3 microrredes, onde esse sistema foi submetido a diferentes situações de operação, permitindo observar se o sistema se comporta de acordo com o projetado.

Nas etapas 3, 4 e 5 foram realizadas respectivamente a síntese do controlador seguindo os conceitos apresentados na Seção 2.2, a tradução dos modelos desenvolvidos em linguagem de programação e o desenvolvimento de um *firmware* para cada camada de controle e integrando-o com seu respectivo *hardware*.

Por fim, as etapas 6 e 7 consistiram na realização de uma comunicação multinível entre as camadas do sistema e o teste do sistema implementado.

Cada etapa citada anteriormente será abordada de forma individual e detalhada nas subseções a seguir.

4.1 MODELAGEM DO SISTEMA EM NÍVEL DE GERADOR

A geração de energia de um gerador genérico foi discretizada e dividida em 3 etapas. Cada etapa representa um aumento ou redução de 33,33% na capacidade de geração do gerador.

Seguindo os conceitos apresentados na Seção 2.2, foi modelada a planta do gerador genérico de energia. A planta nesse caso foi dividida em duas partes, sendo que G_1 modela o funcionamento do gerador e G_2 modela o comunicador do gerador, além de G_3 , G_4 e G_5 que modelam as plantas dos sensores de recurso.

A Tabela 1 descreve a semântica dos eventos de G_1 , G_2 , G_3 , G_4 e G_5 respectivamente.

Tabela 1: Notação para os eventos que compõem o modelo da planta do Gerador

Evento	Descrição	Controlavel
s_i^A , $i = 1, 2, 3$	Evento que indica aumento de um nível na geração do gerador.	Sim
f_i^A , $i = 1, 2, 3$	Evento que indica redução de um nível na geração do gerador.	Sim
A_{qg}	Evento que indica quebra do gerador.	Não
A_{rg}	Evento que indica reparo do gerador.	Sim
d_i , $i = 0, 1, 2, 3$	Evento que indica a demanda requerida pelo sistema.	Não
s_i^R , $i = 1, 2, 3$	Evento que indica se o recurso do sistema é suficiente para a geração do nível $s_{i=1,2,3}^A$ de energia do gerador.	Não

A plantas G_1 , G_2 , G_3 , G_4 e G_5 podem ser vistas na Figura 4.

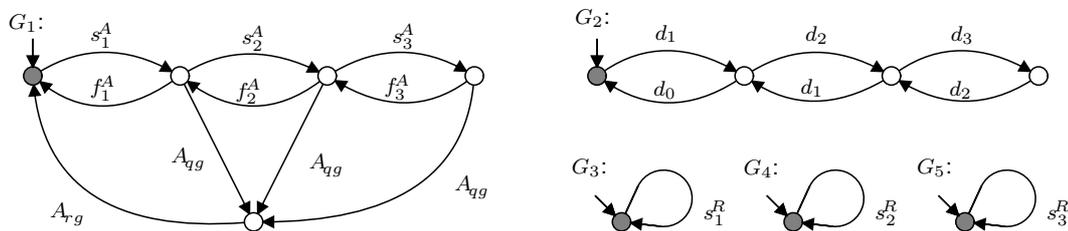


Figura 4: Diagramas das plantas do gerador

Fonte: própria

A planta G_1 é encarregada de definir uma ordem entre o aumento e redução da capacidade de geração da turbina, impedindo que, por exemplo, o nível máximo de geração s_3^A seja acionado sem que o nível anterior s_2^A tenha sido acionado. Ela também

considera a ocorrência de quebras (A_{qg}), levando a planta para um estado *Broken*, e de reparos (A_{rg}), que leva a planta ao estado inicial *Idle*.

A planta G_2 define os níveis de demanda que o gerador pode receber. Como o gerador possui três níveis de geração, o aumento ou redução do nível de produção serão associados aos níveis de demanda por meio de especificações, que serão apresentadas na próxima subseção.

Para tal, informações em tempo real sobre quantidade de recurso disponível são indispensáveis, tendo em vista que a geração de uma turbina sofre alterações de acordo com mudanças físicas, como por exemplo água, vento, combustível, etc. Para obter essa informação foram usados três sensores: s_1^R , s_2^R , s_3^R , cujas plantas estão representadas em G_3 , G_4 e G_5 . Cada gerador é associado a 3 sensores, posicionados de forma que sejam acionados apenas quando o recurso disponível no gerador seja suficiente para a geração de energia dos diferentes níveis de geração s_n^R . Como cada turbina tem três níveis de geração de energia, cada sensor indica se existe recurso suficiente para um respectivo nível de geração.

4.1.1 MODELAGEM DAS ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR

Para definir os requisitos de controle para a planta do sistema, foram definidas as seguintes especificações:

- $E_{i=1,2,3}$: Bloquear o acionamento do nível de geração s_i^A da turbina enquanto não for solicitada uma demanda d_i .
- $E_{i=4,5,6}$: Bloquear o desacionamento f_{i-3}^A do nível de geração s_{i-3}^A da turbina, enquanto uma demanda d_{i-4} não for solicitada.

A Figura 5 apresenta os modelos das especificações.

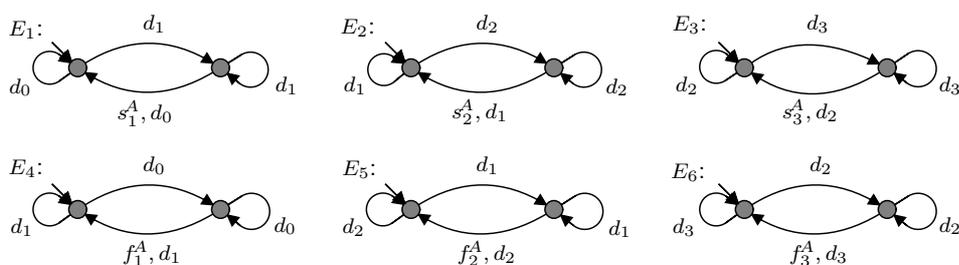


Figura 5: Diagramas das especificações do gerador

Fonte: própria

Por exemplo, o modelo E_2 bloqueia a produção de 66,66% da capacidade do gerador (evento s_2^A) sem que antes essa demanda tenha sido solicitada pela microrrede (evento d_2), e libera para que depois de solicitada essa demanda, seja possível tanto produzi-la, quanto diminuí-la (eventos s_2^A e d_1). Pode-se agora compor esses modelos das especificações à planta e o resultado é o comportamento que se espera do sistema do gerador sob controle.

4.1.2 MAPEAMENTO DO GERADOR

O sistema proposto envolve a transmissão de informações de uma camada à outra buscando melhorar o processo de geração de energia, tornando-o mais flexível e com maior aproveitamento da capacidade individual de geração de cada camada. Sendo assim na transmissão de informações da camada mais baixa onde encontram-se as SCLs, as informações de ID e estado atual de cada gerador, tal como o estado atual dos sensores de recurso são indispensáveis para o bom funcionamento do sistema, pois elas são informações globais, relevantes, portanto ao nível da microrrede, diferentemente dos demais eventos, que interferem apenas em nível local e, assim, não necessitam ser observados pelos demais níveis da arquitetura.

Na microrrede o ID é utilizado para identificar o gerador, o estado é usado para ter conhecimento da geração atual desse gerador, se ele se encontra quebrado ou não, entre outras informações, e o mapeamento dos sensores s_i^R serve para indicar se o nível de recurso disponível é suficiente para geração s_i^A .

Uma microrrede pode conter n geradores e, por isso, o mapeamento é de extrema importância, pois permite que ela tenha uma visão de todos os geradores que a compõe. As informações dos geradores são repassadas à microrrede através de uma comunicação cabeada fazendo uso do protocolo de comunicação ModBus de forma rápida, segura e eficiente.

4.2 MODELO DA MICRORREDE

Uma microrrede possui n geradores, devido a isso, sua capacidade de geração pode variar de poucos megawatts (MW) de potência até valores que podem chegar a 2,5 bilhões de MWh, como na Itaipu por exemplo (BINACIONAL, 2018). A máxima geração de energia de uma microrrede é a soma da geração dos n geradores que a compõe. Nesse trabalho considera-se que cada gerador genérico de energia

aumenta sua geração em uma escala de 33,33%. Sendo assim, a geração de uma microrrede tem $(3 * n) + 1$ níveis (considerando nível zero de produção), com um aumento de $(33,33\%)/(n)$ entre os níveis. A planta G_1 , que representa o nível de geração de uma microrrede de dois geradores, pode ser vista na Figura 6.

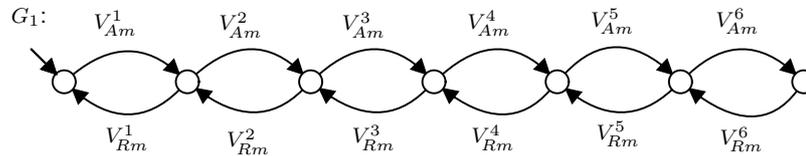


Figura 6: Diagrama do nível de geração de uma microrrede.

Fonte: própria

Os geradores genéricos de energia podem ser distintos em uma mesma microrrede, alterando parâmetros como, por exemplo, o valor máximo possível de geração. No entanto, neste trabalho foi definido sem perda de generalidade que todos os geradores de energia devem ser iguais em uma microrrede, podendo ser distintos de uma microrrede para a outra mas não podendo ser distintos dentro de uma mesma microrrede. De forma prática é considerado que uma microrrede de energia eólica tem n_1 geradores Ge iguais e uma microrrede de energia hidráulica tem n_2 geradores Gh iguais, sendo que geradores Ge são diferentes de geradores Gh .

Além da planta que cuida do nível de geração, uma microrrede também possui uma planta que define o modelo operacional do sistema, responsável por seu funcionamento. A planta G_2 representa o modelo operacional, que é uma visão geral do funcionamento que a microrrede tem em cada nível de geração. O modelo operacional da microrrede é apresentado na Figura 7.

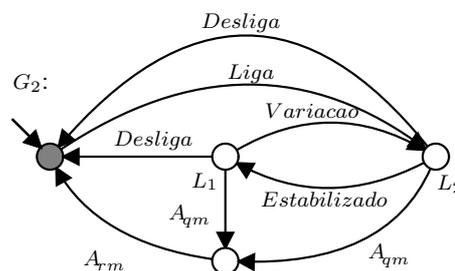


Figura 7: Diagrama Operacional de uma microrrede.

Fonte: própria

Nas tabelas 2 e 3 podem ser vistos os eventos de G_1 e G_2 , respectivamente.

Tabela 2: Notação para os eventos que compõem o modelo da planta do nível de geração

Evento	Descrição	Controlavel
V_{Am}^i	Evento que indica a variação de aumento na geração total de energia da microrrede.	Sim
V_{Rm}^i	Evento que indica a variação de redução na geração total de energia da microrrede.	Não

Tabela 3: Notação para os eventos que compõem o modelo da planta operacional da microrrede.

Evento	Descrição	Controlavel
<i>Desliga</i>	Evento que indica se a microrrede esta desligada.	Sim
<i>Liga</i>	Evento que indica se a microrrede esta ligada.	Sim
A_{qm}	Evento que indica quebra da microrrede.	Não
A_{rm}	Evento que indica reparo da microrrede.	Sim
<i>Variacao</i>	Evento que indica que a geração de energia desejada esta diferente da geração atual da microrrede.	Não
<i>Estabilizado</i>	Evento que indica que a geração de energia atual da microrrede esta igual a geração desejada.	Sim

Nesse trabalho foi usado o critério da sustentabilidade ambiental, para definir a prioridade de escolha das unidades que devem gerar determinadas demandas de energia. Logo, considerou-se que as microrredes de energia renováveis como eólicas e solares são mais prioritárias em relação às de energia não renováveis, como diesel por exemplo. Sendo assim, o controle global usa dessa política de sustentabilidade ambiental para definir a geração de energia de suas microrredes. Entretanto, vale a pena salientar que tal abordagem é meramente ilustrativa e plenamente adaptável para outras políticas de gestão de geração, como custo, otimização, etc. Tais possibilidades são, nesse trabalho, incluídas como perspectivas de pesquisas futuras.

Para o correto funcionamento operacional de uma microrrede, os estados L_1 e L_2 recebem as informações vindas tanto dos geradores quanto do controle global. Nesses estados é feita uma análise dessas informações e alguma decisão é tomada de acordo com a política de controle que foi definida para o sistema. A decisão tomada é repassada ainda nesses estados para a camada inferior (geradores) e para a

camada superior (controle global).

4.2.1 FUNCIONAMENTO DA MICRORREDE

A microrrede, por sua vez, é uma intermediadora entre os geradores genéricos de energia e o controle global. Ela recebe um vetor de informações mapeadas e reportadas a ela por cada gerador, além de receber informações do controle global indicando a demanda que deve suprir. Diante dessas informações, a microrrede apresenta a dinâmica de analisá-las, tomar uma decisão sobre a geração local, reportar essa decisão para os geradores, capturar a geração gerada e, por fim, informar esse resultado ao controle global.

O vetor de informações de cada um dos geradores contém o ID e o estado atual do gerador, e também o estado atual dos sensores de recurso ligados a esse gerador. A microrrede, ao receber o vetor de informações referente a cada um de seus geradores, analisa os dados desse vetor conforme a seguinte sistemática:

- Por meio do ID verifica-se de qual Gerador são as informações recebidas;
- Por meio do estado atual, verifica se o gerador está quebrado ou não, e qual seu nível de geração momentâneo. São definidas também quais as possibilidades de geração e o total de geração de energia do gerador (TP_{ID}^i).
- Por meio do estado atual dos sensores de recurso, verifica qual o total de recurso do gerador (TR_{ID}^i).

Tendo conhecimento dessas informações, pode-se calcular o total de geração da microrrede (i.e., TP_{ID}), o que é dado pela soma dos totais de produção de cada gerador i (i.e., TP_{ID}^i) que a compõe, ou seja,

$$TP_{ID} = \sum_{i=1}^m TP_{ID}^i.$$

A mesma operação é válida para o cálculo dos recursos, ou seja, o total de recurso disponível na microrrede (i.e., TR_{ID}) equivale à soma dos recursos de cada gerador j (i.e., TR_{ID}^j), sendo

$$TR_{ID} = \sum_{j=1}^n TR_{ID}^j.$$

4.2.2 MAPEAMENTO DA MICRORREDE

Assim como o mapeamento do gerador é importante para o bom funcionamento do sistema como um todo, a microrrede também precisa ser mapeada para a camada superior do sistema. A transmissão de informações como o ID e o total de recursos da microrrede, tal como informações referentes ao total de geração e de recurso atual, são informações relevantes, portanto ao nível global. Ao contrário dos demais eventos, que interferem apenas em nível local, essas informações precisam ser observadas pelo nível superior da arquitetura.

No controle global o ID é utilizado para identificar a microrrede, o estado é usado para saber se a microrrede está com a geração de energia desejada, ou está tentando se adaptar a alguma variação. Essa variação pode ser referente a geração de energia desejada, ou aos totais de geração e recurso atual. Essas informações são usadas pelo controle global para auxiliar nas decisões de divisão de demanda entre as microrredes.

O controle global pode conter n microrredes e, por isso, o mapeamento é de extrema importância, pois ele permite que o controle global tenha uma visão de todas as microrredes que o compõe. Essas informações são repassadas para o controle global através de uma comunicação sem fio de forma rápida, segura e eficiente.

4.3 CONTROLE GLOBAL

O controle global é o último nível do sistema, responsável por receber e repassar ao usuário as informações de ID, estado atual, total de produção e de recurso das microrredes que o compõe. É dele também a função de repassar às microrredes e, indiretamente, às unidades de geração, a demanda que cada uma deve suprir de acordo com a política de produção utilizada.

Depois de informar a nova demanda desejada para a microrrede, é responsabilidade da microrrede repassar essas instruções para os geradores. O fluxo das informações pode ser visto na Figura 2.

5 SIMULAÇÃO

A ferramenta utilizada para modelagem das plantas, especificações e para síntese do controlador, disponibiliza um ambiente para simulação do comportamento individual de cada planta e especificação. Fazendo uso desse ambiente, foi simulado o comportamento das plantas e especificações do sistema diante de uma situação pré-definida. As transições que aparecem na cor verde, estão desbloqueadas, ou seja, são opções disponíveis que podem ser tomadas, as que aparecem na cor rosa, são as últimas transições que foram realizadas, e as pretas estão bloqueadas, ou seja, não podem ser feitas.

5.1 SITUAÇÃO SIMULADA NO GERADOR

Primeiramente é necessário definir uma situação a ser simulada. A situação escolhida foi analisar o comportamento de um gerador desligado ao receber comandos de sua microrrede para produzir 33,33% (eventos d_1 na planta do comunicador e s_1^A na do gerador) de sua capacidade. Para isso ser possível, os sensores de recurso $s_{i=1}^R$ do gerador devem ter sido ativados e repassado essa informação à microrrede.

O estado inicial das plantas e especificações do gerador, quando ele se encontra desligado é apresentado nas Figuras 8 e 9.

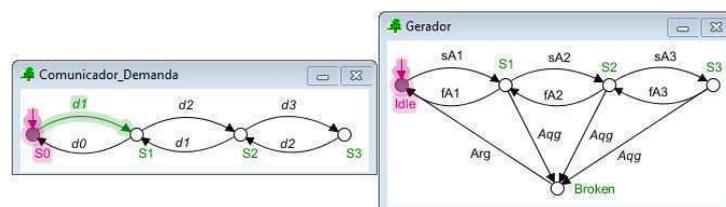


Figura 8: Simulação. Plantas do gerador quando este encontra-se desligado.

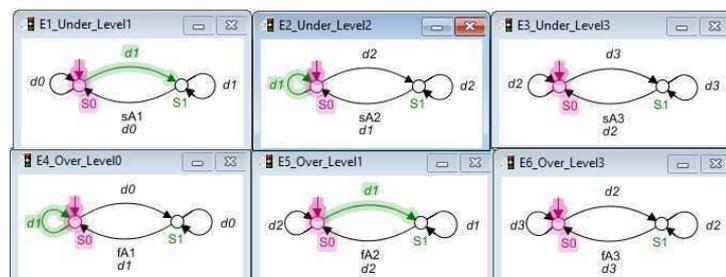


Figura 9: Simulação. Especificações do gerador quando este encontra-se desligado.

Analisado a planta do gerador (G_1), percebe-se que todas as transições estão

bloqueadas, pois o gerador não pode produzir sem ter uma demanda solicitada pela microrrede. No entanto, ao analisar a planta do comunicador (G_2), que define os níveis de demanda que o gerador pode receber (eventos $d_{i=1,2,3}$), percebe-se que o evento d_1 está habilitado, sendo este responsável por solicitar o nível 1 de produção ao gerador.

Analisando agora as especificações do gerador, percebe-se que apenas E_1 e E_2 atuam nesse momento. E_1 garante que o gerador só pode produzir depois de receber a solicitação de demanda da microrrede (Eventos s_1^A no gerador e d_1 no comunicador). Já E_2 garante que não se pode receber uma solicitação de aumento de produção de energia para 66,66% (evento d_2 no comunicador) sem antes ter recebido uma solicitação de produção de 33,33% (evento d_1 no comunicador), respeitando a ordem de aumento de produção de energia no gerador.

Ao receber o comando da microrrede para produzir 33,33% de sua capacidade (evento d_1 no comunicador), o sistema encontra-se no estado representado nas Figuras 10 e 11.

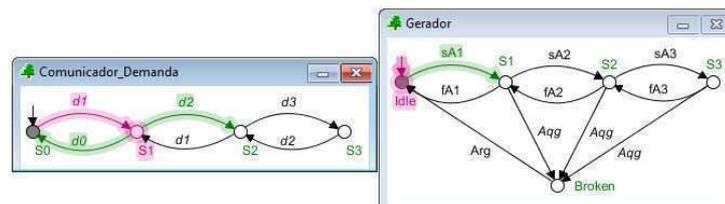


Figura 10: Simulação. Plantas do gerador após receber uma demanda d_1 da microrrede.

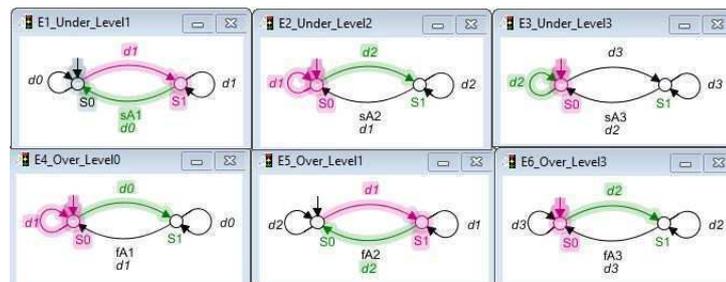


Figura 11: Simulação. Especificações do gerador após receber uma demanda d_1 da microrrede.

Analisado a planta do gerador (G_1), percebe-se que o gerador recebeu uma solicitação de demanda e pode começar a produzir energia (evento s_1^A encontra-se habilitado no gerador). Ao analisar a planta do comunicador (G_2), percebe-se que agora o gerador pode receber um aumento ou redução de demanda (eventos d_2 e d_0 estão habilitados no comunicador). A redução (evento d_0 no comunicador) levaria o gerador de volta a inatividade.

Analisando as especificações, temos que E_1 libera a produção da energia, ou

a redução da demanda solicitada (eventos s_1^A e d_0). Já E_5 cuida para que a microrrede possa solicitar produção de 66,66% (evento d_2).

Caso a microrrede solicitasse uma redução de demanda (evento d_0 no comunicador), o cenário voltaria ao apresentado nas Figuras 8 e 9. Supondo que ela enviase novos aumentos de demanda (eventos $d_{i=2,3}$ no comunicador), o sistema manteria o mesmo padrão de comportamento, tanto nas plantas quanto nas especificações. Porém, como o exemplo busca mostrar o comportamento do sistema para uma produção de 33,33% (evento d_1) o próximo passo é iniciar a produção de energia (evento s_1^A). O sistema encontra-se no estado representado nas Figuras 12 e 13.

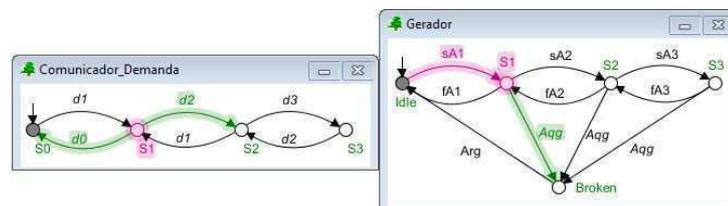


Figura 12: Simulação. Plantas do gerador após produzindo 33,33% (evento s_1^A).

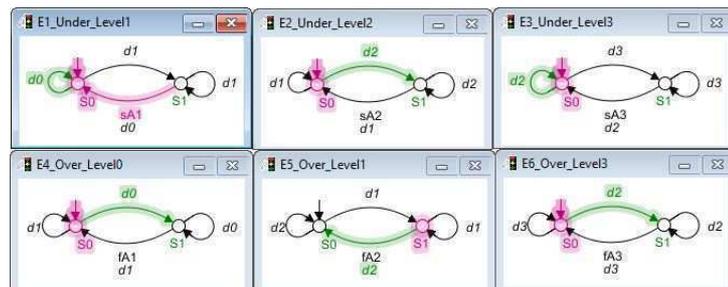


Figura 13: Simulação. Especificações do gerador após produzindo 33,33% (evento s_1^A).

Analisado a planta do gerador (G_1), percebe-se que apenas a quebra encontra-se habilitada (evento A_{qq} no gerador). Isso indica que o gerador está em operação e que não há novas solicitações de produção, pois $s_{i=2,3}^A$ estão desabilitadas. Ao analisar a planta do comunicador (G_2), percebe-se que não houve alteração, isto é, nenhuma nova solicitação foi feita por parte da microrrede.

Analisando as especificações, percebe-se que as únicas ações possíveis são o aumento ou redução da demanda (eventos d_0 e d_2) em relação a última solicitação da microrrede (d_1). Mas também é possível que o gerador quebre (evento A_{qq}). O sistema que temos em caso de quebra encontra-se no estado representado nas Figuras 14 e 15.

Ao analisar as plantas do gerador (G_1) e do comunicador (G_2), nota-se que a única alteração ocorreu em G_1 . Após a quebra (evento A_{qq}) a única transição que pode ocorrer é a de reparo (evento A_{rg}).

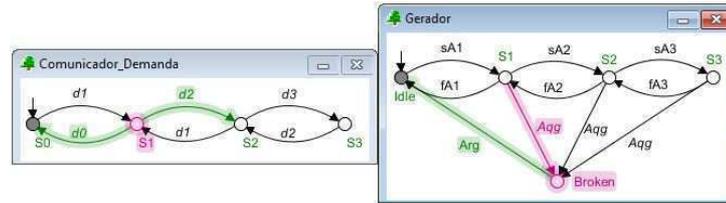


Figura 14: Simulação. Plantas do gerador após a quebra.

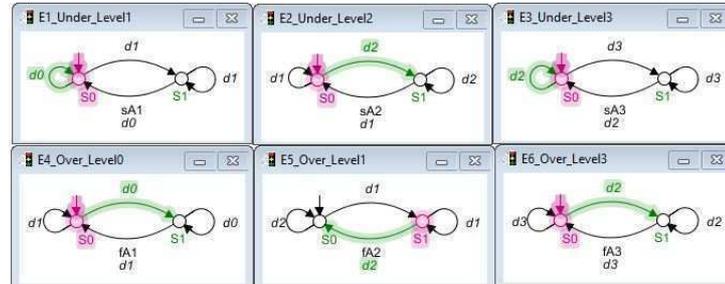


Figura 15: Simulação. Especificações do gerador após quebra.

As especificações também não sofreram alteração alguma, o sistema encontra-se parado, então as especificações não podem agir sobre ele. O sistema que se tem em caso de reparo sempre vai voltar ao estado desligado, o mesmo representado nas Figuras 8 e 9.

Foram simulados os principais comportamentos que o sistema do gerador pode enfrentar no mundo real, deixando mais claro como as plantas e especificações atuam em cada situação.

5.2 SITUAÇÃO SIMULADA NA MICRORREDE

Seguindo o mesmo exemplo utilizado na simulação do gerador, mas agora voltado para a microrrede, vamos analisar qual seu comportamento ao solicitar a um de seus geradores a um aumento da produção de $33,33\%/n$ solicitado pelo controle global. Considerando que essa microrrede tem $n = 2$ geradores, ela possui um comunicador com que recebe instruções de aumento e redução de produção do controle global, e também uma planta que ilustra seu funcionamento.

Inicialmente é importante analisar o estado da microrrede desligada, antes de receber uma solicitação de produção de $16,66\%$ vinda do controle global. A Figura 16 mostra essa situação.

O diagrama do nível de geração da microrrede (quando desligada) está habilitado para receber uma demanda de $16,66\%$ (evento V_{Am}^1 do diagrama do nível de geração da microrrede). Após receber essa demanda o diagrama de nível encontra-se

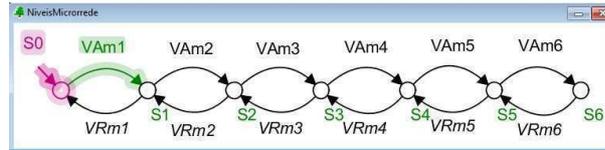


Figura 16: Simulação. Planta do nível de geração da microrrede.

no estado representado na Figura 17. Logo após solicitada uma demanda de produção à microrrede, ela já pode começar a produzir, essa situação é vista na Figura 18. Quando a microrrede está desligada, ela está apta apenas a ligar (evento *Liga* no diagrama operacional da microrrede), e só pode fazer isso se receber uma solicitação de demanda do controle global (evento $V_{Am}^{i=1,\dots,6}$ do diagrama do nível de geração da microrrede).

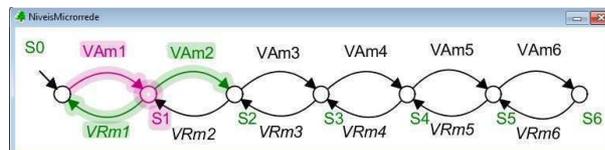


Figura 17: Simulação. Planta do nível de geração da microrrede ao receber uma demanda de 16,66%.

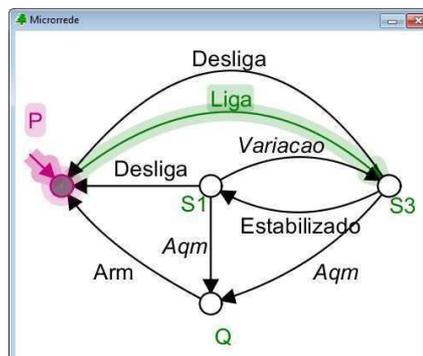


Figura 18: Simulação. Planta operacional da microrrede quando esta encontra-se desligada.

Depois de ligada a microrrede (evento *Liga* no diagrama operacional da microrrede), ela encontra-se na situação ilustrada na Figura 19.

Analisando a Figura 19 percebe-se que após ligada, a microrrede tem uma produção diferente do que deveria, ela está sob uma variação em relação ao desejado. Nesse estado ela pode desligar, estabilizar ou quebrar (eventos *Desliga*, *Estabiliza* e *Aqm* no diagrama operacional da microrrede). Caso ela desligue, a microrrede volta ao estado da Figura 18, porém, se ela buscar estabilizar, ela irá distribuir a produção solicitada a ela igualmente a todos os seus geradores até que a demanda seja suprida. Nesse exemplo específico como foi solicitado apenas 16,66% da capacidade total de produção da microrrede, e ela tem 2 geradores, apenas 1 gerador precisa produzir 33,33% para suprir a essa demanda.

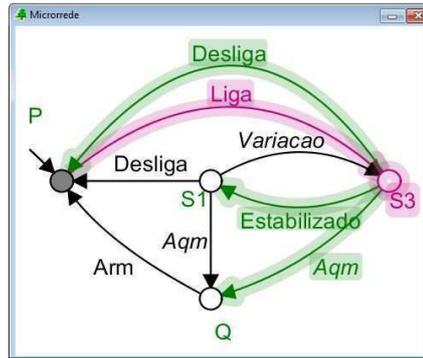


Figura 19: Simulação. Plantas do diagrama operacional da microrrede quando esta encontra-se ligada.

Após o comando ser repassado ao gerador a situação da microrrede passa a ser o representado na Figura 20.

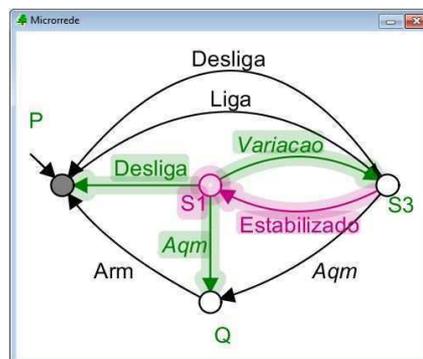


Figura 20: Simulação. Plantas do diagrama operacional da microrrede quando esta encontra-se estabilizada.

Analisando a microrrede depois de estabilizada a produção, percebe-se que mais uma vez ela tem as opções de deligar e quebrar (eventos *Desliga* e *Aqm* no diagrama operacional da microrrede), porém ao invés de poder estabilizar, agora ela pode variar a produção (eventos *Variacao* no diagrama operacional da microrrede). Essa variação pode acontecer ou por uma solicitação de aumento ou redução da demanda da microrrede (eventos $V_{Am}^{i=1,\dots,6}$ e $V_{Rm}^{i=1,\dots,6}$ do diagrama do nível de geração da microrrede), ou por uma quebra de algum dos geradores, ou pela redução do recurso disponível, esses dois últimos seriam informações passadas à microrrede pelos geradores e pelos sensores de recurso respectivamente.

Sobre o evento de quebra (*Aqm*), na microrrede isso só seria possível caso todos os seus geradores quebrassem, caso isso aconteça a situação gerada é vista na Figura 21.

Em caso de quebra, a microrrede é considerada fora de operação e a única possibilidade de ela voltar a operar é mapeada pelo evento de reparo (evento *ARm* do diagrama operacional da microrrede).

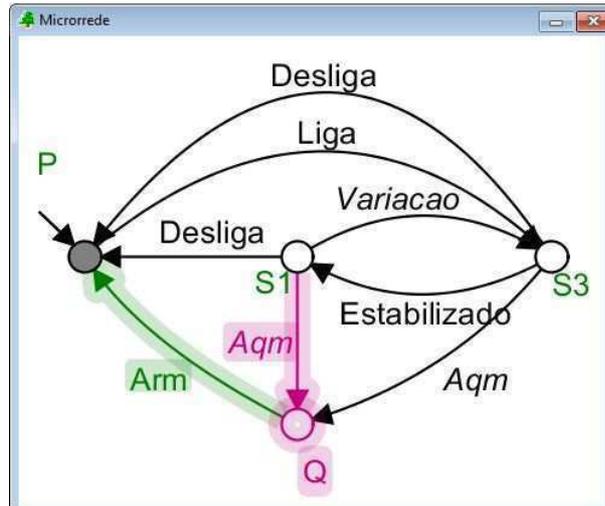


Figura 21: Simulação. Plantas do diagrama operacional da microrrede quando esta encontra-se quebrada.

Simuladas as principais sequencias de eventos aos quais o sistema seria submetido em uma aplicação real, a próxima seção aborda os procedimentos adotados no desenvolvimento e implementação do *firmware* responsável pela execução da lógica desenvolvida.

6 IMPLEMENTAÇÃO

A implementação do sistema foi dividida em diferentes etapas, sendo que para o desenvolvimento dessas etapas foi adotada a metodologia *bottom-up*, isto é, iniciando do controle do gerador genérico de energia e finalizando no controle global. Uma visão geral do sistema é apresentada no diagrama da Figura 22, e as etapas da implementação são descritas nas seções a seguir. Esse trabalho englobou a implementação até o controle da microrrede.

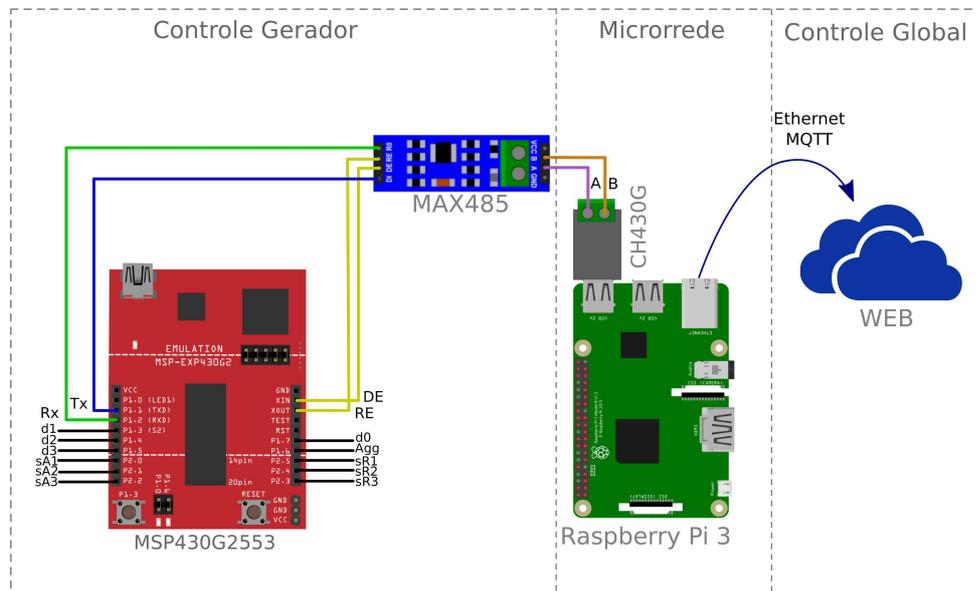


Figura 22: Diagrama do sistema completo.

6.1 IMPLEMENTAÇÃO DO GERADOR GENÉRICO DE ENERGIA

A primeira etapa da implementação do gerador é realizar a conversão do modelo do supervisor em uma linguagem de programação interpretada por um microcontrolador. O supervisor controlável e não bloqueante foi gerado no Software Supremica, compondo plantas e especificações, e sua conversão em linguagem de programação foi realizada pelo *software* Deslab (TORRICO, 2018). Nesse processo foi necessário obter uma relação entre estados de origem, transições e estados destinos do supervisor gerado pelo Supremica. Esses dados foram inseridos manualmente no Deslab, onde também foram parametrizados os estados marcados (finais), o estado inicial e os eventos controláveis e não controláveis.

Em sequência, foi gerado um código em linguagem c, portado para o kit MSP-

EXP430G2 *LaunchPad* MSP430G2553 desenvolvido pela Texas Instruments. Esse microcontrolador tem entre suas principais características a facilidade de compilação em linguagem C e a CPU preparada para operar em baixo consumo (INSTRUMENTS, 2016). O código gerado consiste em um loop, que permanece verificando as informações de demanda vindas da microrrede, e a possibilidade de execução de eventos controláveis. Assim que um evento controlável se torna disponível, a máquina de estados o executa automaticamente, o que nesse caso significa a mudança do nível lógico das portas. Além disso, são constantemente enviadas para a microrrede informações a respeito do estado atual e dos recursos disponíveis.

Já os eventos não controláveis são identificados por meio de interrupções de *hardware*, às quais desviam a execução do *software* do *loop* principal, para que sejam executadas as ações referentes ao evento ocorrido. Isso significa a liberação ou bloqueio de eventos controláveis.

6.2 IMPLEMENTAÇÃO DA MICRORREDE

Diferente do que foi feito com o Controle do gerador genérico de energia, o controle da microrrede não foi desenvolvido a partir da conversão de um supervisor em linguagem de programação. A lógica de controle da microrrede foi desenvolvida diretamente em linguagem de programação, respeitando os requisitos levantados na fase de modelagem. Como o controle global não foi implementado, o código simula também, a troca de informações entre ele e a microrrede.

A microrrede recebe um vetor contendo informações de ID, estado atual e sensores de recurso de cada um dos controles de gerador genérico de energia que a compõe. As informações referentes a cada um desses geradores são armazenadas em uma estrutura de dados, sendo posteriormente feita a soma dos estados atuais e dos sensores de recurso de todos os geradores. Dessa forma são definidas as informações de produção atual e de capacidade de geração total da microrrede.

Quando uma nova demanda é definida, a microrrede a recebe como um valor em porcentagem da sua capacidade total. Em uma microrrede com dois geradores, por exemplo, a demanda poderia ser aumentada em intervalos de $(33, 33\%)/(n)$ onde n é o número de geradores. Caso essa microrrede recebesse uma demanda de 49,99%, seria necessário que um de seus geradores operasse em 66,66% e outro operasse em 33,33%. Dessa forma, foi necessário converter a demanda recebida pela microrrede (dm) em número de fases de gerador (NFG), isto é, a soma das fases em que cada

gerador deve estar para suprir essa demanda. Esse valor é encontrado a partir da expressão $NFG = (dm/(33.33\%/n))$.

Após definido o total de fases de geradores necessária para suprir a demanda solicitada à microrrede, mapeou-se o estado final em que cada gerador da microrrede deveria estar para que a demanda fosse atendida. Como o estado atual é recebido no vetor de informação do gerador, e tendo sido identificado qual o estado final que cada gerador deve estar, desenvolveu-se uma lógica que tratasse tanto da redução, quanto do aumento de produção dos geradores que compõe a microrrede.

A sequência de eventos necessária para alcançar o estado final identificada é transmitida para cada gerador individualmente, respeitando a ordem correta dos eventos definidas nas plantas e especificações do gerador.

6.3 COMUNICAÇÃO ENTRE O GERADOR E A MICRORREDE

A comunicação entre o gerador e a microrrede foi implementada utilizando comunicação serial UART, onde os dados são enviados sequencialmente, bit a bit por meio de um canal de comunicação.

As especificações de meio físico foram definidas pelo padrão RS-485 (*Recommended Standard-485*), também conhecido como EIA-485 (*Electronic Industries Alliance-485*). Ele é um padrão normalizado que especifica detalhes físicos, como os níveis de tensão de operação, número de dispositivos e distância máxima.

O padrão RS-485 permite trabalhar com taxas de comunicação de cerca de 12Mbps, a uma distância de até 1200m na rede, permitindo que até 32 dispositivos se conectem no barramento da rede (FREITAS, 2017).

As conexões dos dispositivos são feitas de acordo com a rede que se deseja implementar, sendo que o RS-485 pode ser tanto *half-duplex* (2 fios) quanto *full-duplex* (4 fios). Nesse trabalho foi usada a conexão *half-duplex*, onde um único par de fios é usado para transmissão e recepção de dados (INSTRUMENTS, 2013).

Como a Raspberry e o MSP430 não possuem por padrão nenhum módulo RS485, foram necessários 2 adaptadores. Na Raspberry foi utilizado um conversor USB serial CH340G, e no MSP430 foi utilizado um *transceiver* MAX485.

Após definidas as especificações de meio físico, foi necessário definir um protocolo da camada de aplicação. O protocolo de comunicação utilizado foi o *ModBus*, que dispõe de dois modos de transmissão (RTU e ASCII), os quais definem a forma

da mensagem que será transmitida em *Bytes*. Nesse trabalho optou-se pela estrutura de mensagens no modo RTU.

O protocolo *ModBus* RTU faz uso do conceito mestre-escravo, suportando até 247 escravos para um único mestre. A comunicação com esse protocolo sempre inicia depois de uma solicitação do mestre a um escravo.

A estrutura das mensagens enviadas pelo mestre e pelo escravo é igual, e pode ser vista na Figura 23. O primeiro *byte* da mensagem é o endereço do escravo ao qual ela se destina, ou o endereço do escravo que está respondendo a uma solicitação do mestre. O código de função vem em seguida e especifica o tipo de função que o mestre está solicitando ao escravo, onde essas funções podem ser, por exemplo, leitura e escrita. Na sequência se encontra o campo de dados, que não tem tamanho fixo, e seu conteúdo depende da função utilizada e dos valores transmitidos. Por fim, o campo CRC encerra a mensagem, tendo por objetivo auxiliar na conferência de erros de transmissão, que nesse caso é feita pelo método CRC-16(*Cycling Redundancy Check*) (FREITAS, 2014).

Endereço	Função	Dado	CRC Check
8 bits	8 bits	N x 8 bits	16 bits

Figura 23: Diagrama do pacote de informações transmitido pelo protocolo ModBus.

Definidos os protocolos a serem utilizados, os mesmos foram implementados no microcontrolador e na Raspberry com o auxílio das bibliotecas FreeModBus e LibModBus respectivamente. A partir dessa implementação foi possível validar, por meio de simulações e testes, o funcionamento da microrrede e do controle do gerador quando diferentes demandas eram solicitadas, em diferentes estados do sistema. Dessa forma, foi verificado que os requisitos iniciais do projeto, excluindo o controle global, se comportaram como o planejado.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para o desenvolvimento de uma arquitetura descentralizada fazendo uso dos conceitos de I4, integrados à TCS, para a coordenação de operação em geração distribuída de energia.

O trabalho compreendeu desde a modelagem, fazendo uso de autômatos, das plantas e especificações dos geradores genéricos de energia, bem como a implementação de um controle supervisão desse sistema em um microcontrolador. A microrrede, por sua vez, teve seu funcionamento definido pela modelagem de uma planta, porém, seu controle foi desenvolvido diretamente em linguagem de programação, e implementado em uma Raspberry Pi. A comunicação entre esses dois sistemas de controle foi realizada de maneira serial, utilizando-se do protocolo ModBus, por meio de uma interface física RS485.

Uma sequência de testes e simulações foi realizada a fim de validar o correto funcionamento de cada etapa do sistema. Apesar da ausência do controle global, o mesmo foi simulado na camada da microrrede, permitindo verificar o comportamento do sistema quando submetido a exigência de diferentes demandas.

Como perspectiva de trabalhos futuros vislumbra-se a implementação do controle global, e a extensão dessa abordagem a um número maior de geradores e microrredes.

REFERÊNCIAS

AKESSON, K; FABIAN, M; FLORDAL, H; MALIK, R; VAHIDI, A; SKOLDSTAM, M; CENGIC, G. **Supremica**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.supremica.org/>>.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. [S.l.]: ANEEL, 2012.

AUSGRID. **Source of electrical energy**. 2017. Disponível em: <<http://learnelectricity.ausgrid.com.au/Common/For-Students-in-Years-7-and-8/Sources-of-electrical-energy.aspx>>. Acesso em: 26 out. 2017.

AYAN, Onur; TURKAY, Belgin Emre. Comparison of lighting technologies in residential area for energy conservation. In: IEEE. **Sustainable and Renewable Energy Engineering (ICSREE), 2017 2nd International Conference**. [S.l.], 2017. p. 116–120.

BADAWI, Mohamed El; IQBAL, Tariq; MANN, George K. Optimization and a comparison between renewable and non-renewable energy systems for a telecommunication site. In: IEEE. **Electrical & Computer Engineering (CCECE), 2012 25th IEEE Canadian Conference on**. [S.l.], 2012. p. 1–5.

BINACIONAL, ITAIPU. **ITAIPU BINACIONAL**. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>.

BRITO, Sérgio de Salvo. Centro de referência para energia solar e eólica. **CRESESB Informe-Rio de Janeiro**, v. 12, n. 13, p. 3, 2008.

CAMEIRA, RENATO FLÓRIDO; BERNARDI, JULIA SCARLETT BURG; SANTOS, LUIZ FELIPE ALMEIDA DOS. Indústria 4.0 e manutenção preditiva. 2015.

CASSANDRAS, Christos G; LAFORTUNE, Stephane. **Introduction to discrete event systems**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.

CAUS, Tuane Regina. Energia hidrelétrica: eficiência na geração. Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

DAMASCENO, Isabelle Aparecida *et al.* Pequenas centrais hidrelétricas (pchs): conceitos, normas e a pch malagone. Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

DELAI, Andre Luiz. **Sistemas Embarcados: a computação invisível**. 2013. Disponível em: <<http://www.hardware.com.br/artigos/sistemas-embarcados-computacao-invisivel/conceito.html>>. Acesso em: 06 nov. 2017.

DIENSTMANN, Gustavo. Projeto de diplomação energia solar. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

DIENSTMANN, Gustavo. Energia solar: uma comparação de tecnologias. 2009.

DRATH, Rainer; HORCH, Alexander. Industrie 4.0: Hit or hype?[industry forum]. **IEEE industrial electronics magazine**, IEEE, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014.

EMBARCADOS. **Sistema Embarcado - O que é? Qual a sua importância?** 2013. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/sistema-embarcado/#>>. Acesso em: 03 nov. 2017.

EMPRESA, DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional 2017: ano base 2016. **Rio de Janeiro: EPE**, 2017.

FEUP, Coordenador Projeto; FIRMINO, Manuel; SOUSA, Armando; PINTO, Carlos; CATARINO, Joana; CORREIA, Manuel; LEITE, Pedro; COSTA, Sara. Energia solar.

FREITAS, Carlos Márcio. **Protocolo Modbus: Fundamentos e Aplicações**. 2014. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/protocolo-modbus/>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

FREITAS, Carlos Márcio. **Redes de comunicação em RS-485**. 2017. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/redes-de-comunicacao-em-rs-485/>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

GATTE, Mohammed Taih; KADHIM, Rasim Azeez; RASHEED, Farhan Leftah. Using water energy for electrical energy conservation by building of micro hydroelectric generators on the water pipelines that depend on the difference in elevation. In: IEEE. **Energy, Power and Control (EPC-IQ), 2010 1st International Conference on**. [S.l.], 2010. p. 379–383.

HARRISON, Robert; VERA, Daniel; AHMAD, Bilal. Engineering methods and tools for cyber–physical automation systems. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 104, n. 5, p. 973–985, 2016.

HATZIARGYRIOU, ND; ANASTASIADIS, AG; VASILJEVSKA, J; TSIKALAKIS, AG. Quantification of economic, environmental and operational benefits of microgrids. In: IEEE. **PowerTech, 2009 IEEE Bucharest**. [S.l.], 2009. p. 1–8.

HERNANDEZ, DM; PERALTA, G; MANERO, L; GOMEZ, R; BILBAO, J; ZUBIA, C. Energy and coverage study of lpwan schemes for industry 4.0. In: IEEE. **Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM), 2017 IEEE International Workshop of**. [S.l.], 2017. p. 1–6.

HOPCROFT, John E.; MOTWANI, Rajeev; ULLMAN, Jeffrey D. **Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation**. 2. ed. United States of America: Pearson Education, 1939.

INSTRUMENTS, Texas. **User's Guide**. 2013. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/sllu173b/sllu173b.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

INSTRUMENTS, Texas. **User's Guide**. 2016. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau318g/slau318g.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

KLIEMANN, Bruna Caroline Kotz; DELARIVA, Rosilene Luciana. Pequenas centrais hidrelétricas: cenários e perspectivas no estado do paraná. 2015.

LEWIS, Harry R; PAPADIMITRIOU, Christos H. **Elements of the Theory of Computation**. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 1997.

LI, Qing; YAO, Caroline. **Real-time concepts for embedded systems**. [S.l.]: CRC Press, 2003.

LOREY, Luiz Fernando; IHA, Fábio Hideki; HOFFMANN, Lara; PEREIRA, Isabela Ferreira; SILVA, Ivo Chaves da; DIAS, Bruno Henriques; MARCATO, André Luís Marques. Stochastic optimization applied to brazilian hydroelectric seasonalization of assured energy. In: IEEE. **PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven**. [S.l.], 2015. p. 1–6.

MACHOWSKI, Jan; BIALEK, Janusz; BUMBY, James Richard. **Power system dynamics and stability**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1997.

MARCHI, Gabriel Nunes *et al.* **Análise das PCH's antes e após a criação da Aneel**. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2010.

MARINHO, Gisele Souza Parmezani. Apresentação de uma indústria sucroalcooleira sob os conceitos de microrrede de energia elétrica. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2011.

MARWEDEL, Peter. **Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things**. [S.l.]: Springer, 2017.

OLIVEIRA, Lucas Braga de; MARCELINO, Carolina G; MILANÉS, Anolan; ALMEIDA, Paulo EM; CARVALHO, Leonel M. A successful parallel implementation of nsga-ii on gpu for the energy dispatch problem on hydroelectric power plants. In: IEEE. **Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on**. [S.l.], 2016. p. 4305–4312.

RAMADGE, Peter J; WONHAM, W Murray. Supervisory control of a class of discrete event processes. **SIAM journal on control and optimization**, SIAM, v. 25, n. 1, p. 206–230, 1987.

RAMADGE, Peter JG; WONHAM, W Murray. The control of discrete event systems. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 77, n. 1, p. 81–98, 1989.

RESEARCH, Institute for Energy. **History of Electricity**. 2014. Disponível em: <<https://www.instituteforenergyresearch.org/history-electricity>>. Acesso em: 15 out. 2017.

SALDIVAR, Alfredo Alan Flores; LI, Yun; CHEN, Wei-neng; ZHAN, Zhi-hui; ZHANG, Jun; CHEN, Leo Yi. Industry 4.0 with cyber-physical integration: A design and manufacture perspective. In: IEEE. **Automation and computing (icac), 2015 21st international conference on**. [S.l.], 2015. p. 1–6.

SIMABUKULO, Lucas Antonio Nizuma; CORREA, Luiz Filipe da Silva; SANTOS, Manoel Messias Oliveira dos; MARTINS, Mariana. Energia, industrialização e modernidade—história social.

SOUSA, Rodrik José Schau Menezes Araújo *et al.* Os desafios do mercado de pequenas centrais hidrelétricas no brasil. 2015.

TEIXEIRA, Marcelo. Explorando o uso de distinguidores e de autômatos finitos estendidos na teoria do controle supervisorio de sistemas a eventos discretos. Tese de Doutorado - Doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2013.

THISTLE, John G. Synthesis of supervisory controls for discrete event systems. In: IEEE. **Application of Concurrency to System Design, 2004. ACSD 2004. Proceedings. Fourth International Conference on.** [S.l.], 2004. p. 151.

TORRICO, César Rafael Claire. **Controle Discreto.** 2018. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/controldiscreto9/instaladores>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

TRADE&INVEST, Germany. **Industrie 4.0-Smart Manufacturing for the Future.** 2017. Disponível em: <<https://industrie4.0.gtai.de>> Acesso em: 26 out. 2017.